

2. 研究報告

2. 1. 研究課題

本節には、気象研究所が令和4年度に実施した全ての研究について、研究区分（または外部資金）ごとに分類し、研究課題名を掲載している。

経常研究

中期研究計画の5年間（令和元年度開始）では、気象業務の発展に資するため、気象・気候・海洋分野については目的に応じた3つの研究に分類し、地震・津波・火山研究と合わせて大きく4分類して経常的に実施する研究（以下「経常研究」という。）を実施する。令和4年度は、次の9課題を実施した。

基盤技術研究

研究課題	研究期間	代表研究部
地球システム・海洋モデリングに関する研究	R1～R5	全球大気海洋研究部
大気の物理過程の解明とモデル化に関する研究	R1～R5	気象予報研究部
データ同化技術と観測データの高度利用に関する研究	R1～R5	気象観測研究部

課題解決型研究

研究課題	研究期間	代表研究部
台風・顕著現象の機構解明と監視予測技術の開発に関する研究	R1～R5	台風・災害気象研究部
気候・地球環境変動の要因解明と予測に関する研究	R1～R5	気候・環境研究部

地震・津波・火山研究

研究課題	研究期間	代表研究部
地震と津波の監視・予測に関する研究	R1～R5	地震津波研究部
南海トラフ地震の地震像とスロースリップの即時把握に関する研究	R3～R7	地震津波研究部
火山活動の監視・予測に関する研究	R1～R5	火山研究部

応用気象研究

研究課題	研究期間	代表研究部
シームレスな気象予測の災害・交通・産業への応用に関する研究	R1～R5	応用気象研究部

地方共同研究

地方共同研究は、気象業務の現場において取り組むべき研究課題について、気象研究所と気象官署が共同して行う研究である。地方共同研究により、気象業務の現場における潜在的なニーズを的確にとらえ、気象研究所の研究方針や内容に適宜反映させることによって、気象業務の高度化に貢献する。

また、研究活動を通じて気象研究所と気象官署の連携を強化し、気象官署における調査業務の支援を図るとともに、職員の資質向上にも貢献する。令和4年度は、次の3課題を実施した。

研究課題	研究期間	実施官署	担当研究部
二重偏波レーダーを用いた火山噴煙の解析的研究	R 2 ～R 4	鹿児島地方気象台	火山研究部
メソアンサンブルを利用した決定論的予測技術の改善	R 4 ～R 5	札幌管区気象台、仙台管区気象台	台風・災害気象研究部
台風に伴う強風現象に対する地域特性に関する研究	R 4 ～R 5	東京管区気象台	台風・災害気象研究部

緊急研究

重大な自然災害発生時には、機動的に研究を行い社会にいち早く情報を発信するための緊急研究課題を必要に応じて実施する。令和4年度は、次の1課題を実施した。

研究課題	研究期間	代表研究部
集中観測等による線状降水帯の機構解明研究	R 3 ～R 4	研究連携戦略官

他省庁予算による研究

他省庁予算による研究は、国土交通省以外の省庁が運用する制度のもとで実施する研究である。令和4年度は、次の4課題を実施した。

(1) 地球環境保全等試験研究費による研究（環境省）

地球環境保全等試験研究費は、地球環境問題のうち、地球温暖化分野を対象として、各府省が中長期的視点から計画的かつ着実に関係研究機関において実施すべき研究に活用される経費である。

研究課題	研究期間
大気成分の長期観測による海洋貯熱量および生態系への気候変動影響のモニタリング	R 1 ～R 5
民間航空機を利用した大都市から全球までの温室効果ガス監視体制の構築	R 3 ～R 7
日本域に沈着する光吸収性不純物に起因する雪氷面放射強制力の時空間変動監視と気候システムへの影響解明	R 4 ～R 8

(2) 放射能調査研究費による研究（環境省）

放射能調査研究費は、放射能・放射線に対する国民の安全を確保し、安心感を醸成するため、環境中の天然放射能、及び核爆発実験、原子力施設、投棄された放射性廃棄物等からの人工放射能の環境放射能レベルに関する調査研究を目的とする研究に活用される経費である。

研究課題	研究期間
人工放射性核種の大気長期変動監視に関する研究	R 4

(3) 官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）による研究（内閣府）

総合科学技術・イノベーション会議が政府全体の科学技術イノベーション政策の司令塔として、民間の研究開発投資誘発効果の高い領域（ターゲット領域）に各府省の施策を誘導し、それらの施策の連携を図るとともに、必要に応じて、追加の予算を配分することにより、領域全体としての方向性を持った研究開発を推進するための経費である。

研究課題	研究期間
AI を用いた竜巻等突風・局地的大雨の自動予測・情報提供システムの開発	H30～R 4

共同研究

共同研究は、気象研究所が、その所掌事務と密接に関連する事項について、気象庁以外の者と共同して行う調査及び研究である。令和4年度は、次の70課題を実施した。

・主な共同研究

共同研究区分	研究課題名	相手機関
「富岳」成果創出加速プログラム	大アンサンブルを用いた短時間領域スケール予測	気象業務支援センター
気候変動予測先端研究プログラム	領域課題1「気候変動予測と気候予測シミュレーション技術の高度化（全球気候モデル）」の一部業務「イベント・アトリビューション研究の深化と発展」及び領域課題3「日本域における気候変動予測の高度化」	気象業務支援センター
戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期	線状降水帯の形成とその環境場の解析に関する研究	防災科学技術研究所
	線状降水帯の早期発生予測の精度向上に関する基礎的研究	福岡大学 防災科学技術研究所
戦略的創造研究推進事業（CREST）	「Fish Tech による持続可能な漁業モデルの創出」における On-Spot データ同化手法の開発に関わる共同研究	海洋研究開発機構

・その他の共同研究

研究課題名	相手機関
気象研究所大気大循環モデル（MRI-AGCM）を用いた気候変動の影響評価に関する研究	京都大学防災研究所
水蒸気のリモートセンシングに関する研究開発	情報通信研究機構
東海地域における弾性波アクロスを用いた地殻状態変化検出に関する研究	名古屋大学 静岡大学
粒子画像解析に基づく乱流計測技術に関する研究	国立環境研究所
気候システムの形成と変動に係わる諸過程の研究	筑波大学
次世代植物プランクトン多様性モデルを用いた、気候変動に対する植物プランクトンの応答の評価	北海道大学
なだれ予測の精度向上に資する積雪変質モデルの基礎的研究	防災科学技術研究所
南鳥島におけるハロカーボン類のモニタリング	国立環境研究所環境計測研究センター
エアロゾルモデルのモジュールの開発と検証に関する共同研究	東京大学 名古屋大学
傾斜・ひずみデータを活用したスロー地震解析等に関する研究	防災科学技術研究所
火山ガス等の化学的手法と物理観測データに基づく火山活動評価研究	東海大学
古気候の形成とその変動に係わる諸過程の研究	京都大学
大雨や大雪をもたらす降水雲・降雪雲の観測的数値的研究	北海道大学

箱根山における多項目観測データを活用した総合的火山活動評価に関する研究	神奈川県温泉地学研究所
ひまわり 8 号大気追跡風を用いた台風強化プロセスに関する研究	富山大学
高精度センシング技術を用いた、列車運行判断のための災害気象の監視・予測手法の開発	JR 東日本研究開発センター
南鳥島における二酸化炭素鉛直平均濃度観測	東京大学大気海洋研究所
領域モデルを用いた長期再解析に関する研究	東北大学
筑波山頂におけるエアロゾル雲相互作用のプロセス解明に関する研究	筑波大学
東京スカイツリーを利用した東京圏の温室効果ガス排出のモニタリング研究	国立環境研究所
民間航空機を用いた温室効果ガス観測に関する研究	国立環境研究所 日本航空株式会社 株式会社ジャムコ 財団法人日航財団
石垣島のスロースリップ域における重力変化に関する研究	東京大学理学部 沖縄気象台
積雪地域における雲の放射影響の研究	北見工業大学
シチズンサイエンスによる気象観測データのデータセット作成と応用可能性に関する研究	三重大学
メソアンサンブル予報を用いた再生可能エネルギー出力予測に関する研究	気象庁情報基盤部 産業技術総合研究所 日本大学
台風の強度解析・予報精度向上に資する台風の衰弱時や多重壁雲時における風・中心気圧の関係及び強度変化メカニズム解明	気象庁大気海洋部 名古屋大学
顕著現象の監視・予測におけるフェーズドアレイレーダーの利用可能性に関する研究	東京都立大学
レーダーと AI 深層学習による竜巻等突風の探知・予測に関する基礎的研究	東京大学
南九州の活動的火山の災害軽減に関する共同研究（その 2）	京都大学防災研究所 防災科学技術研究所 気象庁地震火山部 福岡管区気象台地震火山課 鹿児島地方気象台
日本海寒帯気団収束帯による豪雪対策のための研究開発	防災科学技術研究所
現地観測と気象予報モデルの連携によるヒマラヤにおける降水システムに関する研究	名古屋大学
メソアンサンブル予報を用いた確率洪水予報に関する研究	気象庁予報部 東京大学生産技術研究所
航空機の動態情報取得システムからの気象データによる数値予報の精度向上と航空機の安全運航に関わる気象予測情報の高度利用のための研究	海上・港湾・航空技術研究所
日本の海洋大循環モデルを用いるコミュニティのための前処理、後処理、解析基盤の構築	東京大学 九州大学 海洋研究開発機構
顕著現象の予測精度向上に向けたデータ同化およびアンサンブル技術に関する研究	筑波大学

局地気象モデル境界層過程の高度化に関する研究	日本気象協会
気象衛星高頻度観測と巨大アンサンブル計算の利用による水文気象災害予測の革新	東京大学
衛星搭載ドップラー風ライダーの開発・利用に関する研究	東京都立大学
稠密地上気象観測と数値モデルによる降雪雲の微細構造に関する研究	酪農学園大学
電力設備のための気象・気候ハザードの温暖化影響評価	電力中央研究所
長基線レーザー伸縮計を用いた地殻変動現象に関する研究	東京大学地震研究所 富山大学
高頻度高層観測データを利用した重力波の発生メカニズム及び乱流強度推定に関する研究	東京大学
炭素・水素同位体比観測と大気化学輸送モデルに基づく全球メタン収支の解明	東北大学
深層学習（DL）技術等を用いた衛星データ同化の高度化に関する研究	千葉大学
JPN モデルの海洋ゴミ漂流、赤潮伝搬への適用、および、海洋エネルギー利用技術創出可能性の検討	長崎大学
南海トラフ地震想定震源域東部海域の地震活動に関する共同研究	東海大学
JPN モデルの沿岸海域への適用と湾スケールの物理環境変動特性の解明	北海道大学 筑波大学
東京スカイツリーを利用したエアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究	防災科学技術研究所 情報・システム研究機構 広島大学 東海国立大学機構 名古屋大学 東京大学
地上ガンマ線観測及びレーダー観測を組み合わせた雷放電の予知に関する共同研究	大阪大学
雷放電経路3次元観測システムと C-Band 二重偏波気象レーダーを用いた帯電した降水粒子の分布の実態把握及び発雷危険度の推定手法に関する共同研究	防災科学技術研究所
伊豆半島周辺の沿岸域における海洋酸性化状況の把握	筑波大学
大雨や大雪をもたらす降水雲・降雪雲の時間発展に関する観測的数値的研究	叡啓大学
翌日および翌々日程度先の日射量予測技術の開発	気象庁情報基盤部 産業技術総合研究所 日本大学
長期の気候予測情報を活用した農業支援情報の高度化に関する研究	気象庁大気海洋部 食品産業技術総合研究機構
現地観測と気象予報・気候予測モデルの連携による北極域大気・雪氷環境変化の実態把握	情報・システム研究機構
全球降水観測計画（GPM）等の衛星データと地上観測測器による線状降水帯の機構解明に関する研究	宇宙航空研究開発機構
線状降水帯の発生環境場（特に水蒸気場）の観測	三重大学

線状降水帯の発生環境場（特に水蒸気場）の観測	琉球大学
線状降水帯の発生環境場（特に水蒸気場）の観測・解析	長崎大学
線状降水帯の発生環境場（特に水蒸気場）の観測	鹿児島大学
線状降水帯などの降水系内部構造の観測的研究	山口大学
積乱雲の発雷非発雷予測と雷パラメーター推定に関する共同研究	静岡県立大学
地球システムモデルの高度化と成層圏過程を通じた予測可能性に関する研究	九州大学
顕著現象のリアルタイム検出・予測技術の社会実装に向けた研究	政策研究大学院大学
小型衛星のデータ同化及び、衛星搭載降水ドップラーレーダの観測有効性調査に関する研究	情報通信研究機構

公募型共同利用による研究

公募型共同利用による研究は、大学及び研究機関の教官または研究者が研究代表者となり、他の研究機関の研究者とともに、特定の研究課題について当該研究所の施設、設備、データ等を利用して共同で行う研究である。令和4年度は、次の40件の研究を実施した。

相手機関	共同利用区分	課題名	期間
総合地球環境学研究所	共同研究	空気浄化と住民の健康改善に向けた農業残渣焼却を低減させるためのスマートシステムの構築に関する研究	R1～R5
京都大学防災研究所	研究集会	最新の成果を踏まえた気候変動予測・影響予測研究に関する研究集会 ～気候変動予測と災害激甚化への適応～	R4
京都大学生存圏研究所	共同研究	アジア圏界面エアロゾル層(ATAL)の影響研究：2003～2022年夏季の日本でのライダー連続観測に基づいて	R4
統計数理研究所	研究集会	データ同化ワークショップ	R4
	公募利用	雲解像非静力学気象モデルを用いた粒子フィルタの開発	R4
東京大学地震研究所 京都大学防災研究所	共同研究	リアルタイム地震情報配信手法の高度化に向けた地盤特性の影響度評価	R4
東京大学地震研究所	共同研究	深層学習とデータ同化の協働による固体地球科学の深化	R4
		高頻度 SAR 観測による地殻・地表変動研究	R4
		活火山火口湖の水・熱・化学物質収支の長期評価と火山活動変動との関係について：蔵王山と御釜	R4
		水蒸気噴火を起こす火山の活動把握：火山ガス・火口湖水・温泉水等の化学分析に基づく地球化学的アプローチ	R4
		地球深部の構造とダイナミクス	R4
		伊豆大島火山マグマ活動の解明に向けた精密重力観測	R4

東京大学地震研究所	共同利用	複合災害を考慮した確率論的津波浸水評価	R 4
		過去の活発な地震活動の震源再決定	R 4
東京大学地震研究所	研究集会	地震動をはじめとする地球科学データの即時解析・即時予測・情報利活用	R 4
東京大学大気海洋研究所	共同研究	世界海洋大循環モデルの相互比較	R 4
	共同利用	冬季黒潮での乱流と熱・栄養塩・稚仔魚輸送過程	R 4
		中・東部北太平洋南北断面観測による生物地球化学・生態学の統合研究	R 4
東京大学地震研究所	外来研究員	データ同化手法を用いた火山灰の拡散及び噴煙ダイナミクスの解析	R 4
東京大学大気海洋研究所	外来研究員	熱帯低気圧・温帯低気圧・ハイブリッド低気圧の高解像度シミュレーション	R 4
		メソ気象における雲降水プロセスの解明とデータ同化に関する研究	R 4
海洋研究開発機構	外来研究員	地域気候モデルを用いた大規模将来予測計算の整備と評価	R 4
国立環境研究所	外来研究員	大都市圏における大気境界層の気象場及び温室効果ガスの高解像度シミュレーション	R 4
		大気化学輸送モデルによる全球メタン収支・トレンド推定に関する研究	R 4
九州大学応用力学研究所	共同研究	衛星・地上ライダー/レーダー解析のための氷雲・降雪粒子の散乱特性データベース開発	R 4
北海道大学低温科学研究所	共同研究	次世代日本域気象・積雪モデルの開発と検証	R 4
千葉大学環境リモートセンシング研究センター	研究集会	SKYNET-Japan 研究会	R 4
データサイエンス共同利用基盤施設	共同研究	海洋データシステムにおけるアルゴフロート観測データやその誤差のインパクト評価に関する研究	R 4
新潟大学災害・復興科学研究所	共同研究	長期間の交通障害をもたらす海岸平野部の集中降雪動態の解明	R 4
東京工芸大学	共同研究	日本版改良藤田スケールにおける DI、DOD と被害風速の評価	R 4
国立極地研究所	研究集会	2022 年度エアロゾル・雲・降水に関する研究集会	R 4
	共同研究	近年の極端気象の激甚化に関わる極域寒気の動態の解明	R 4 ～R 5
一般社団法人カーボンリサイクルファンド	共同研究	海洋における CO ₂ 吸収・循環過程の見える化のための次世代モビリティの開発と沿岸浅海域のブルーカーボンの解析	R 4 ～R 5
宇宙航空研究開発機構	共同研究	地上放射観測による検証データの取得と GCOM-C 大気プロダクトの評価	R 4 ～R 6
		km-スケールの数値天気予報モデルのための雲と降水同化	R 4 ～R 6
		複数の衛星データを利用した火山灰アルゴリズムの高度化	R 4 ～R 6

宇宙航空研究開発機構	共同研究	衛星による大気観測と地表面プロダクトを用いた エアロゾル再解析による気候変動の監視	R 4～R 6
		PIXEL グループによる高頻度SAR観測による地殻・ 地表変動研究	R 4～R 6
		イメージャー及び衛星搭載ライダーデータを用いた 複合エアロゾル同化予測システムの開発	R 4～R 6
		衛星搭載レーダーと気象庁全球予報システムを用いた モデル検証と全球同化	R 4～R 6

環境研究総合推進費による研究

環境研究総合推進費は、研究活動による科学的知見の集積や科学的側面からの支援等を通じ、オゾン層の破壊や地球温暖化など、数々の地球環境問題を解決に導くための政策に貢献・反映を図ることを目的とした研究に活用される経費である。平成 29 年度からは環境再生保全機構交付の個人補助金となった。

研究課題	研究期間
気候変動に伴う黄砂の発生・輸送に関する変動予測とその検出手法に関する研究	R 2～R 4
地球温暖化に関わる北極エアロゾルの動態解明と放射影響評価	R 2～R 4
大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響評価	R 3～R 5
船舶観測に基づく海洋 CO ₂ フラックスデータの精緻化	R 3～R 5
アジアモンスーン・熱帯域の温暖化予測不確実性の低減を踏まえた東アジアでの気候変化予測	R 4～R 5

科学研究費助成事業による研究

科学研究費助成事業（科研費）は、人文・社会科学から自然科学まであらゆる分野で、独創的・先駆的な研究を進展させることを目的として文部科学省、日本学術振興会により制度化されている研究助成費であり、研究者が計画する学術研究に対して、ピア・レビュー（専門分野の近い複数の研究者による審査）が行われ、重要と認められた計画に助成される「競争的研究資金」である。

なお、科研費は個人としての研究者に交付されるものであるが、研究者が所属する研究機関が、科研費について管理・諸手続を研究者に代わって行うことと定められている。

【研究代表者として実施している研究課題】

課題区分	課題名	研究期間
新学術領域研究 (研究領域提案型)	対流圏ジェットの季節予測可能性に対する対流圏成層圏結合と 中緯度海洋前線帯の役割	R 4～R 5
	温暖化する中緯度大気海洋場における台風温帯低気圧化の力学 過程の解明	R 4～R 5
	過去 40 年間の南極氷床表面質量収支高精度計算	R 2～R 3*
基盤研究 (A)	豪雨早期予測に向けた船舶搭載型水蒸気・風観測ライダーの 開発と海上実証実験	R 4～R 8
	統合粒子モデル開発による水物質を介した気象変化と環境汚染 の相乗効果の解明	R 1～R 4

基盤研究(B)	船舶搭載 GNSS による東シナ海水蒸気、波浪、海面高度の観測	R 2 ～R 4
	新世代衛星観測の同化がもたらす、台風と大気上層場との相互作用メカニズムの解明	R 1 ～R 4
	森林火災から大量に生じる固体有機エアロゾルの発生・除去過程の解明と気候影響	R 1 ～R 4
	ハイブリッド低気圧の形成メカニズムと多様性の体系的解明	R 3 ～R 6
	グリーンランド氷床雪氷質量変動に対する北極温暖化増幅の影響解明	R 3 ～R 5
	深層学習を使った気象場ダウンスケーリングと大気環境予測	R 3 ～R 7
	揺れの数値予報：広帯域時刻歴波形のリアルタイム予測	H29～R 2 *
	積雪が稀な地域での大雪発生状況の把握と現在及び将来の大雪発生ポテンシャルの評価	R 1 ～R 4
	最先端の地上大気観測とデータ同化で、線状降水帯の予測精度はどこまで向上するのか？	R 1 ～R 4
	地球温暖化の循環場への影響を定量化する新しいイベント・アトリビューション	R 4 ～R 9
特別研究員奨励費	大気物質循環における湿性沈着過程のモデル再現精度の向上	R 2 ～R 5
	夏季の北極低気圧の理解と短期～季節内スケールの北極大気予測精度向上	R 4 ～R 6
国際共同研究加速基金	グリーンランド氷床気候システム研究最前線の開拓	H30～R 5
	環境場の違いがもたらす多様な温帯低気圧構造の形成機構解明	R 1 ～R 5
	孤立峰における雲風洞を用いたエアロゾル・雲相互作用に関する研究	H29～R 4
挑戦的研究（萌芽）	固体粒子のナノスケール構造・化学分析から挑む氷晶核メカニズムの解明	R 1 ～R 5
基盤研究(C)	観測情報の拡充による全球大気予測の高度化に関する研究	H29～R 5
	巻雲を介した熱帯成層圏対流圏結合と気候変動影響の解明	R 1 ～R 5
	衛星観測データを活用した次世代炭素循環解析システムの構築	R 1 ～R 5
	夏季の成層圏-対流圏結合系における力学-放射-化学過程の解明と気候影響評価	R 2 ～R 5
	積乱雲を解像した高解像度モデルを用いた新たな竜巻等突風の予測手法に関する研究	R 2 ～R 5
	二重偏波レーダーによる豪雨形成過程の観測手法の開発ー大粒の雨はどこで生成するかー	R 2 ～R 5
	パナマにおける将来気候下での降水変化予測とメカニズム解明	R 2 ～R 5
	フェーズドアレイ気象レーダーを用いた竜巻の機構解明と三次元検出技術の開発	R 3 ～R 6
	高頻度高密度観測データ活用のための多重スケールを考慮した変分法データ同化の確立	R 3 ～R 5
	稠密・面的な非ガウス観測データの同化手法の刷新	R 3 ～R 7
	集中豪雨の発達機構を解明する水物質同化手法の研究	R 3 ～R 5
	地球温暖化による大雨の頻度・強度変化の機構解明	R 3 ～R 6

基盤研究(C)	高解像度・大アンサンブルシミュレーションを用いた線状降水帯に寄与する環境場の解明	R3～R5
	津波想定はなぜ外れる？一波源形成から海岸到達の各伝播過程で生じる予測誤差の比較	R3～R5
	観測点1点だけからの地震波動伝播の情報抽出：地震動即時予測の高度化に向けて	R3～R5
	地殻内の歪みエネルギーの可視化による内陸地震発生メカニズムの解明	R3～R5
	津波波源の多様な時間履歴に対応した波源推定とそれを活用したリアルタイム津波予測	R3～R5
	大気エアロゾルの混合状態による雲核能・氷晶核能の変化に関する実験的研究	R3～R5
	地上・衛星観測網による東アジアのエアロゾルの半世紀の変動とコロナ禍の影響の解明	R3～R5
	温度成層下の乱流境界層における秩序構造とその空間分布の解明	R4～R6
	雲微物理素過程分類による降水組成マッピングを用いた降水メカニズム解明に関する研究	R4～R6
	海洋表層温暖化を通じた大気環境場・台風活動変質過程の理解	R4～R7
	経験的調整パラメーターのない高精度大気解析の実現	R4～R7
	二重偏波気象レーダーによる火山噴煙内部の凝集プロセスの観測及び解明	R4～R6
	高解像度波浪再解析による日本沿岸長期変動特性の解明	R4～R6
	オゾンの衛星観測データ均質化とマルチセンサ長期再解析	H30～R4
	新世代気象衛星のマルチバンド観測を用いた台風の暖気核発達プロセスの解明	H30～R4
	黒潮周辺海域における急激な海面水温上昇のメカニズム解明とその沿岸環境への影響評価	R1～R4
	大気-積雪-海水系放射伝達モデルの開発と気候モデル用海水アルベドスキームの高度化	R2～R4
	マルチモデル相互比較による事例別の季節予測可能性	H30～R4
若手研究	内部減衰と散乱減衰の3次元不均質構造推定-震度予測の高度化へむけて	H30～R5
	台風の温帯低気圧化に伴う竜巻発生環境場形成に関する数値的研究	R1～R5
	高解像度アンサンブルシミュレーションによる首都圏の降雪現象の機構解明	R2～R5
	同時多発地震に対応した自動震源推定法による隠れた微小地震活動の解明	R2～R5
	エアロゾル粒子の表面形態が及ぼす水晶形成への影響解明	R2～R5
	スプリット前線を伴う温帯低気圧の構造とそれに関わる大雨・集中豪雨の発現機構	R2～R5
	衛星観測を活用した陸域雲降水粒子のより分け推定と鉛直分布推定アルゴリズムの開発	R2～R6

若手研究	梅雨と秋雨の過去 120 年間の長期変動の実態とメカニズムの解明	R 3 ～R 6
	顕著現象予測精度向上を目指した粒子フィルタによるハイブリッドデータ同化手法の構築	R 3 ～R 6
	地震の震源特性はどれだけ空間変化するのか: 散乱波を用いた精密推定	R 3 ～R 6
	放射性炭素同位体比観測と数値モデル解析に基づく全球メタン収支の解明	R 3 ～R 5
	中間圏および下部熱圏の温度構造形成機構における大気微量化学種の役割	R 4 ～R 8
	台風急発達の多様なプロセスの体系的理解と急発達前兆現象の解明	R 1 ～R 4
研究活動スタート支援	二重偏波レーダーを用いた新たな降水粒子判別手法の開発と雷・突風の前兆把握への応用	R 1 ～R 5
	黒潮海流系に対する大規模大気・海洋変動の影響評価	R 3 ～R 5
	巨大アンサンブルを用いた浸水危険度と被災者数の確率的な高精度推定手法の開発	R 4 ～R 5
	高時空間解像度かつ高精度な陸域雲データの創出	R 1 ～R 4
	観測ビッグデータを活用した変分法データ同化の高度化	R 1 ～R 4
	スピンドウン問題解決に向けた変分法同化スキームへの水蒸気バランス機構の導入	R 1 ～R 4

【研究分担者として実施している研究課題】

課題区分	課題名	研究期間
新学術領域研究 (研究領域提案型)	台風・爆弾低気圧の予測可能性とスケール間大気海洋相互作用	R 1 ～R 5
	急速に温暖化する日本周辺海域での大気海洋相互作用と極端気象	R 1 ～R 5
	雲・エアロゾルを介した中緯度大気海洋相互作用	R 1 ～R 5
	ハイブリッド海洋観測：黒潮続流域の循環変動とその大気・生物地球化学への影響	R 1 ～R 5
	黒潮・親潮等海洋前線帯の大気海洋結合系における役割とその経年変動の予測可能性	R 1 ～R 5
	中緯度域の気候変動のメカニズム解明と予測可能性	R 1 ～R 5
学術変革領域研究(A)	時空間マルチスケールモデルからの予測：大規模計算と Slow-to-Fast 地震学	R 3 ～R 7
	情報科学と地球物理学の融合による Slow-to-Fast 地震現象の包括的理解領域名「Slow-to-Fast 地震学」	R 3 ～R 7
	河口から大陸棚における物質とエネルギー拡散過程	R 4 ～R 9
基盤研究(S)	世界一の確度をもつ過去 200 年間の沈着エアロゾルのデータベース創成と変遷解明	H30～R 4
	航空機観測によるスーパー台風の力学的・熱力学的構造と強化プロセスの解明	R 3 ～R 7
	革新的大気成分広域観測による気候変動及び炭素・酸素循環の包括的評価	R 4 ～R 8
基盤研究(A)	新世代気象衛星の台風高頻度観測による高精度風プロダクト開発と台風の変動過程の解明	R 1 ～R 4

基盤研究(A)	実環境大気エアロゾルの帯電状態が生体および地表面への粒子沈着へ及ぼす影響評価	R2～R5
	高精度海水情報取得のためのマイクロ波放射伝達モデルの開発	R2～R4
	大気と海洋の波動エネルギーのシームレス追跡解析による熱帯・中緯度相互作用の解明	R4～R7
	アジア高山域における氷河水体温度の地理的分布把握と次世代氷河変動モデルの開発	R4～R8
	梅雨末期の豪雨の水蒸気起源の追跡－異なる水蒸気の立体構造の降水システムへの影響－	R4～R8
	先端遠隔計測観測と数値モデルを結合したエアロゾル多元要素同時同化に関する研究	R4～R7
	大気海洋境界領域の微生物学：海泡濃集と雲核へのリンケージ	R4～R8
	北極温暖化増幅に対する北極の水・物質循環の影響評価	R3～R6
基盤研究(B)	次世代の天気予報での雷予報を見据えた先駆的雷気象モデルの開発	R2～R5
	西岸境界流と内側沿岸循環の力学的相互作用	R2～R5
	成層圏力学場が熱帯低気圧の発生・発達過程に与える影響	R3～R6
	都市における「暖かい雨」メカニズムの解明と数値予報モデルの最適化	R3～R5
	太陽光発電システム上の積雪動態の解明と予測への展開	R3～R5
	科学的モデリングによる気象レーダーの高解像度化	R3～R6
	ダストの視点から見た地球人間圏：ダストモデル精度向上のための広域枯れ草量推定	R4～R6
	線状降水帯の停滞メカニズムおよびその環境場形成に寄与する大気擾乱の階層構造の解明	R4～R7
	アジョイントモデルによる津波の後続最大波予測	R4～R7
	気温0℃近傍で形成される多様な融解粒子のモデル化と探知	R4～R6
基盤研究(C)	適切な感情喚起による減災意図-行動ギャップの解消を目指したfMRI 実験と行動実験	R4～R7
	沖合津波観測記録を用いた非地震性津波の自動検知と津波波源即時推定手法の開発	H30～R4
	衛星搭載風ライダーによる風高度分布観測の空間分解能最適化に関する研究	R1～R4
	突風・豪雨などの極端現象に関わる乱流の実態・メカニズムとその役割の解明	R1～R4
	非定常な地震活動に対する点過程モデルと予測手法の開発	R2～R4
	大気自由振動モード群の生成・維持・減衰機構の解明	R3～R5
	遠く離れた沖合域への河川水流入プロセス解明と生物生産へのインパクト評価	R4～R6
国際共同研究加速基金(B)	機械学習を利用したハイブリッド緊急地震速報の開発	R4～R7
	気候変動に対するエアロゾルの放射効果-気候変動-大気汚染の相乗作用の評価	R3～R6

2. 研究報告

2.1. 研究課題

特別研究促進費	トンガ海底火山噴火とそれに伴う津波の予測と災害に関する 総合調査	R3～R4
挑戦的研究(萌芽)	超小型衛星による地域主体水管理の概念実証に向けた水文 気象情報と衛星条件の地域分析	R3～R5

* 補助事業期間をR4年度まで繰越

2. 2. 研究年次報告

本節には、気象研究所が令和4年度に実施した経常研究、地方共同研究について、課題毎に当該年度の研究計画と研究成果等を掲載した。

ただし、令和4年度に終了した研究課題（2課題）については2.3節でそれぞれ報告する。

2. 2. 1. 経常研究

・ M 地球システム・海洋モデリングに関する研究・・・・・・・・・・・・・・・・	24
・ P 大気の物理過程の解明とモデル化に関する研究・・・・・・・・・・・・・・	41
・ D データ同化技術と観測データの高度利用に関する研究・・・・・・・・・・・・	57
・ T 台風・顕著現象の機構解明と監視予測技術の開発に関する・・・・・・・・・・	74
・ C 気候・地球環境変動の要因解明と予測に関する研究・・・・・・・・・・・・	90
・ S 地震と津波の監視・予測に関する研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	107
・ N 南海トラフ地震の地震像とスロースリップの即時把握に関する研究・・・・・・・・	113
・ V 火山活動の監視・予測に関する研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	118
・ A シームレスな気象予測の災害・交通・産業への応用に関する研究・・・・・・・・	130

2. 2. 2. 地方共同研究

・ メソアンサンブルを利用した決定論的予測技術の改善・・・・・・・・・・・・	139
・ 台風に伴う強風現象に対する地域特性に関する研究・・・・・・・・・・・・・・	143

M 地球システム・海洋モデリングに関する研究

研究年次：4年目／5年計画（令和元年度～令和5年度）

研究代表者：山中吾郎（全球大気海洋研究部長）

課題構成及び研究担当者

（副課題1）気象・気候予測のための地球システムモデリングに関する研究

副課題代表者：石井正好

〔全球大気海洋研究部〕吉村裕正、出牛 真、平原翔二、神代 剛、吉田康平、新藤永樹
高谷祐平、足立恭将、大島 長、中野英之、浦川昇吾

〔気象予報研究部〕川合秀明、長澤亮二、庭野匡思

〔気象観測研究部〕堀田大介

〔気候・環境研究部〕保坂征宏、水田 亮、辻野博之、行本誠史

（副課題2）マルチスケールに対応した海洋予測技術の開発に関する研究

副課題代表者：中野英之

〔全球大気海洋研究部〕豊田隆寛、坂本 圭、浦川昇吾、川上雄真、藤井陽介、碓氷典久、
広瀬成章、吉村裕正、高谷祐平、新藤永樹、山中吾郎

〔気候・環境研究部〕辻野博之

〔応用気象研究部〕高野洋雄

（副課題3）次世代海洋データ同化・大気海洋結合データ同化に関する研究

副課題代表者：石川一郎

〔全球大気海洋研究部〕藤井陽介、碓氷典久、広瀬成章、中野英之、豊田隆寛、坂本 圭、
浦川昇吾、川上雄真、吉村裕正、高谷祐平、山中吾郎

〔気象観測研究部〕岡本幸三、石橋俊之

〔気候・環境研究部〕遠山勝也

〔応用気象研究部〕高野洋雄

（副課題4）全球数値予報モデル、季節予測システムに関する研究

副課題代表者：吉村裕正

〔全球大気海洋研究部〕高谷祐平、新藤永樹、足立恭将、藤井陽介、豊田隆寛、浦川昇吾、
吉田康平、平原翔二

〔気象予報研究部〕川合秀明

〔気候・環境研究部〕保坂征宏、今田由紀子、小林ちあき、辻野博之

（副課題5）化学輸送モデル、大気微量成分同化に関する研究

副課題代表者：眞木貴史

〔全球大気海洋研究部〕関山 剛、出牛 真、大島 長、梶野瑞王、足立光司

〔気象観測研究部〕酒井 哲、吉田 智

〔台風・災害気象研究部〕永井智広

〔気候・環境研究部〕直江寛明

研究協力者：【氏名（機関）】

金濱貴史、平原幹俊、小森拓也、久保勇太郎、高倉寿成、中村 貴、鎌田 茜、中川勝之
（数値予報課数値予報モデル技術開発室）、

延与和敬、山田広大、小木昭典（環境・海洋気象課）

檜垣将和、櫻木智明、吉田拓馬、浅井博明（数値予報課地球システムモデル技術開発室）

杉本裕之（気候情報課）

田口幸輝、八木晃司（海洋気象情報室）

研究の動機・背景

(社会的背景・意義)

近年、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いる。また、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の重要性が増大している。さらに、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。こ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。

一方、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。

(学術的背景・意義)

これまでの数値解析予報モデルは地球温暖化予測や季節予報を目的としたモデルを除き、大気、海洋、波浪、物質輸送など（以下、構成要素）のモデルが個別に開発されてきた。気象庁の現業で使用しているモデルも多くがそれぞれの業務目的に対応した構成要素を予測対象としており、他は境界値などの形で与えて各構成要素間の相互作用が適切に扱われていない。

このため、大気、海洋、波浪、陸面、雪氷、物質輸送等の地球システムを構成する多様な要素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」として総合的に扱う数値解析予測モデルによって精緻に解析・予測することが重要である。多様な目的に対応するための階層的な「地球システムモデル」（気象庁「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」より）の考え方にに基づき、現業と研究の双方に利用できる最先端の数値解析予測システムを構築する。

ここで、階層的な「地球システムモデル」とは、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を意味する。予測の精度を上げていくには、各要素モデル間で連携しながら開発を進めていく必要がある。本研究課題ではその考え方に基づいて研究を進める。

(気象業務での意義)

「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。

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「地球システムモデル」の考え方にに基づいた研究を進める。これにより、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、その成果を様々な時間・空間スケールの現象の高精度の解析と予測に適用させられる「階層的」な「地球システムモデル」の考え方に基づいた統合的な研究課題とし、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) 気象・気候予測のための地球システムモデリングに関する研究

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、気象・気候予測の精度向上と不確実性低減に貢献する。

(副課題2) マルチスケールに対応した海洋予測技術の開発に関する研究

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、気候変動予測情報や日本周辺の海洋環境情報の高度化に貢献する。

(副課題3) 次世代海洋データ同化・大気海洋結合データ同化に関する研究

海洋及び大気海洋結合に関連したデータ同化システムの改良を通じて、沿岸の詳細な海況情報の発表や大気海洋結合モデルを用いた週間・1か月アンサンブル予報や季節予報などで用いる初期値の改善に貢献する。

(副課題4) 全球数値予報モデル、季節予測システムに関する研究

季節予測システムの改良を通じて、現業季節予報の精度向上に貢献する。その成果を利用しながら週間・1か月予報の改良を進める。

(副課題5) 化学輸送モデル、大気微量成分同化に関する研究

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。また、これらの物質に関して多様なリモートセンシング観測データを用いて分布に関する監視と、化学輸送モデルを検証・改良すると共に、データ同化技術を開発・改良する。また、これらの各種プロダクトや手法を用いた応用研究（視程、排出量逆解析等）を実施する。

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について高精度の解析と予測を行う。

(副課題1) 気象・気候予測のための地球システムモデリングに関する研究

高解像度化を可能にする新しい地球システムモデルを開発し、数日以上前からの台風の発生や強度の予測など、気象予測の新たな可能性を探る。また、積雲対流過程、境界層過程、雲物理過程など各種物理過程や物質循環過程を高度化し、全球規模の気候変動予測の高精度化を図るとともに、台風や梅雨など地域規模の現象の高精度な再現と変動予測を可能とする。

(副課題2) マルチスケールに対応した海洋予測技術の開発に関する研究

- ・海洋モデルの高解像度化に対応して、物理プロセスを改良する。
- ・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。
- ・開発した海洋モデルを用いて、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。
- ・海洋モデルの開発効率を向上させるため、海洋モデル開発基盤の整備を行う。

(副課題3) 次世代海洋データ同化・大気海洋結合データ同化に関する研究

- ・平成30年度までに開発した全球海洋データ同化システム及び日本近海海洋データ同化システムを現業化する。
- ・海況の再現性改善に向け、衛星海面水温の直接同化などを用いた新たな海洋データ同化手法を開発する。
- ・開発した海洋データ同化システムを適用して大気海洋結合同化システムを改良し、改善した大気海洋結合モデル初期値を作成すると共に、結合同化の解析インパクトを明らかにする。
- ・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行う。

(副課題4) 全球数値予報モデル、季節予測システムに関する研究

平成33年度現業化を目標として次期季節予測システムの開発・改良を行う。さらに将来の季節予測システムに向けた開発と1か月より短い予報の大気海洋結合化を含むフィジビリティ研究を行う。

(副課題5) 化学輸送モデル、大気微量成分同化に関する研究

- ・気象研究所地球システムモデル（MRI-ESM2）におけるエアロゾル、オゾン等の化学輸送モデルを高度化する。
- ・領域化学輸送モデルを高解像度化すると共に、気象庁領域モデル（asuca）対応を行う。
- ・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を開発する。
- ・ライダー・衛星・地上（分光日射）観測により、エアロゾル等の分布を監視する。
- ・衛星に関しては衛星から組成別の光学的厚さ算出を目指す。

- ・大気微量成分のデータ同化システムを開発・高度化して、エーロゾル・オゾンに関しては本庁での業務開始・高度化を支援する。
- ・エーロゾル・オゾンに関する再解析を高度化する。
- ・温室効果ガス輸送モデルや逆解析を高度化する。
- ・視程・排出量逆解析に関する技術開発を進める。

研究成果

(1) 今年度得られた成果の概要

(全体)

地球システムモデル開発では、大気・海洋モデルの力学フレームの高精度化と高解像度化に関わる作業を進めるとともに、新地球システムモデル (MRI-ESM2) の各コンポーネントの組立を完了し、気候再現実験に着手した。海洋モデル開発では、可変鉛直格子座標の導入や海氷モデルの熱力学過程の改良を進めるとともに、MRI.COM ver. 5 を作成し、マニュアルを気象研技術報告に出版した。また、GSM の海洋結合による短期予報への影響評価や日本沿岸海面水位長期変動のメカニズム解明を行った。海洋データ同化開発では、海面水温を独立変数とした新たな解析手法を開発するとともに、日本沿岸海況監視予測システムを活用して急潮など海洋顕著事例の調査を行った。また、大気海洋結合同化システムを改良するとともに、「国連海洋科学 10 年」プロジェクト SynObs のキックオフワークショップを開催した。季節予報システム開発では、令和 3 年度に現業運用を開始した季節予報システム (CPS3) の精度評価の取りまとめを行って記述論文を出版するとともに、季節予報システムを用いた予測可能性の研究を進めた。大気化学輸送モデル開発では、MRI-ESM3 構築に貢献するとともに、二酸化炭素逆解析システムへの衛星データ導入に関する論文を作成した。また、統合化学モデル開発に着手し、領域化学輸送モデル (asuca-chem) の業務化を支援するなど、本庁化学輸送モデルの維持管理について協力を行なった。

(副課題 1) 気象・気候予測のための地球システムモデリングに関する研究

- ・大気・海洋モデルの力学フレームの高精度化と高解像度化に関わる作業を進めた。
- ・新地球システムモデル (MRI-ESM3.1) の開発を進め、新大気モデルの気候モデル化、化学モデルの新大気モデルへの対応、炭素循環を含む陸面モデルの気候モデル化のための作業を行い、新モデルの組立が完了し、気候再現実験に着手した。
- ・積雲対流過程や境界層＋浅い対流過程の高度化のための新しいスキームの開発を進めた。

(副課題 2) マルチスケールに対応した海洋予測技術の開発に関する研究

(1) 海洋モデルのプロセス改良

- ・任意の鉛直座標系を可能とする ALE スキームにおいて表層付近は深度、内部領域ではポテンシャル密度を用いるハイブリッド鉛直座標を利用可能とし、全球 $1/4^\circ$ 海洋モデルで 1 年積分が実行できることを確認した。
- ・順圧モデル・コンポーネントの通信削減により、日本沿岸モデル (JPN モデル) の高速化を行った。
- ・メルトボンドや海氷塩分など、海氷モデルの熱力学過程の改良と検証を行った。
- ・潮汐由来の鉛直拡散係数のパラメタリゼーションを利用可能とし、全球モデルでの評価を行った。

(2) 次世代の海洋予測技術の開発

- ・高分解能大気海洋結合モデルによる 11 日予測実験の結果を用いて、熱帯不安定波の解析を行うとともに、台風と黒潮の解析を行って論文を発表した (Kawakami et al. 2022)。

(3) 海洋変動機構の解明

- ・日本周辺の海面水位の長期変動を明らかにし、論文を発表した (Nakano et al. 2022)。
- ・道東の気象台・測候所の歴史的観測データと大気・海洋の再解析を用いて、北海道沿岸の海水変動を調べた。
- ・JPN モデル (解像度 2km) における日本海中層水沈み込みについて等密度面解析を行い、従来モデル (10km) に対する再現性の改善を確認した。
- ・海洋モデル (解像度 10km) を用いて数値実験を行い、経年以上の時間スケールにおける黒潮や水塊の変動が、暖候期ではなく寒候期の気象変動に起因することを明らかにし、論文を発表した (Kawakami et al. 2023)。

(4) 海洋モデルの開発基盤の整備

- ・海洋モデル MRI.COM v5.0 をリリースするとともに、同バージョンに対応するマニュアルを作成し、気象研技術報告として出版した (Sakamoto et al., 2023)。

(副課題3) 次世代海洋データ同化・大気海洋結合データ同化に関する研究

(1) 既存システムの検証と改良

- ・気象庁季節予報システム (CPS3) の全球海洋データ同化システム (MOVE-G3) について、4次元変分法の導入が解析精度に及ぼすインパクトを詳しく検証し、論文を発表した (Fujii et al. 2023)。
また CPS3 に導入した新しい海洋初期アンサンブル手法について論文を発表した (藤井ら, 2022)。

(2) 新たな海洋データ同化手法の開発

- ・SST を独立変数とした新たな解析スキームの開発を進めた。Himawari SST のバイアスを補正して同化することによる精度の向上を確認した。また、新しい海洋モデルに対応したアジョイントコードのバージョンアップを進め、今年度中を目途に完了する予定である。

(3) 大気海洋結合同化システムの改良

- ・昨年度開発を開始した新たな大気海洋結合同化システム (MRI-CDA2) について、大気部分の高解像度化 (水平 20 km) を主とする改良を行った。

(4) 海洋観測のインパクト評価と観測最適化に向けた研究

- ・異常潮位や急潮等のメカニズム等について調査を進めた。特に 2022 年 8 月に福井県で漁業被害をもたらした急潮について、JPN システムの再現性を確認し、本庁に情報共有を行った。1971 年 9 月に発生した異常潮位の要因を定量的に調べた論文を発表した (Hirose et al, 2022)。
- ・アルゴフロートの高塩化ドリフトの影響評価のための観測システム実験 (OSE) を実施し、各国機関の同様の実験との比較に着手した。
- ・気象研究所が主導的に提案していた海洋・結合予測システムにおける海洋データのインパクト評価に関する国際協力を促進するための「Synergistic Observing Network for Ocean Prediction」 (SynObs) が「国連海洋科学の 10 年」プロジェクトに採択され、そのキックオフワークショップを開催した。

(副課題4) 全球数値予報モデル、季節予測システムに関する研究

(1) 次期季節予測システムの運用開始 (令和3年度予定) に向けた開発・精度評価

- ・本庁と協力して、季節予測システム CPS3 (令和3年度に運用開始) の開発・精度評価のとりまとめを行い、記述論文を発表した (Hirahara et al. 2023)。
- ・CPS3 低解像度版での毎日 5 メンバー 30 年分の予測実験を行い、最適なアンサンブル構成の検討を行った。
- ・CPS3 の大気モデルと海洋モデルの水平解像度の違いが季節内・季節予測の精度に及ぼす影響を調査し、大気・海洋が高解像度ほど SST 領域平均値の予測精度が高い傾向をもつことを確認した。
- ・秋のバレンツールカラ海の海水と冬のユーラシアの大気循環場の予測可能性への影響に関する論文を発表した (Komatsu et al. 2022, GRL)。秋のバレンツールカラ海の海水は冬のユーラシアの大気循環場の予兆ではなく、ユーラシアの大気循環場がバレンツールカラ海の海水やユーラシアの地上気温偏差を作っていることが示唆された。
- ・チベット陸面の降水への影響に関する論文を発表した (Xue et al. 2022, BAMS)。
- ・IWTC-10 の報告書執筆を通じて台風季節予測の研究に関する最新の知見を共有した。
- ・東アジアの秋季積雪の季節内予測への影響に関する論文を投稿した (Komatsu et al.)。

(2) 将来の季節予測システムに向けた開発・フィジビリティ研究

- ・本庁と協力して、大気海洋結合モデルの季節内予測への適用について調査を行い、特に第三週以降の予測での海洋結合の有効性を確認した。
- ・新たな確率予測検証の手法について検討を行なった (論文投稿, Takaya et al.)。
- ・渦解像海洋結合モデルによる季節予報フィジビリティスタディのための環境構築を開始した。
- ・CPS3 や地球システムモデル (MRI-ESM3) で使用しているカップラー SCUP に機能を追加し、大気モデルリデュースド格子のサポートと、出力専用プロセスを持つモデルへの対応を行った。
- ・MRI-ESM3 を使用した季節予測フィジビリティ研究のための開発・初期値等の整備を行った。
- ・本庁数値予報課から提供されたオフライン陸面モデル (CPS3 と同じ iSiB 2003 版) を気象研スパコンに移植し、iSiB 2003 版を MRI-ESM3 に導入することにより、オフラインとオンラインの陸面モデルを共通化した。

- ・MRI-ESM2 で導入した境界層の変更（雲水の予報変数化に対応等）を MRI-ESM3 に導入した。
- (3) 海洋観測システムの季節予報への影響に関する研究
 - ・M3 課題と連携して、OceanPredict の観測システム評価タスクチームと結合予測タスクチームの合同会合、および SynObs のキックオフ会合（国際会議）をつくばにおいて開催し（気象研究所がホスト）、今後の SynObs における海洋観測システムの評価に向けて議論を行った。
 - ・M3 課題と連携して、CPS3 を用いた季節内～季節予測への海洋観測のインパクト評価のための感度実験の準備を進めた。

(副課題5) 化学輸送モデル、大気微量成分同化に関する研究

(1) 化学輸送モデルに関する研究

- ・全球化学輸送モデルの検証及び改良を継続すると共に新地球システムモデル（MRI-ESM3.1）の開発に協力した。
- ・M1 課題と協力してオゾン簡易モデルの開発に着手した。
- ・領域化学輸送モデル（NHM-Chem, asuca-Chem）の開発および検証を進めるとともに、asuca-Chem の業務導入支援を実施した。
- ・大気化学・エーロゾル統合モデルの開発に必要な諸準備を実施した。
- ・本庁化学輸送モデルの維持管理に係る協力を実施中。

(2) データ同化・応用技術に関する研究

- ・外部機関と連携してエーロゾルデータ同化システムの改良（複合衛星同化など）等を実施中。
- ・JRA-3Q 用オゾンの品質評価等や本庁への助言等を実施した。
- ・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実施し、論文を執筆中。
- ・二酸化炭素逆解析システムへの衛星観測データの導入に関する論文を執筆中。

(3) 大気微量成分の鉛直分布観測

- ・エーロゾルライダーの観測を継続した。
- ・ライダー観測データを用いた MRI-ESM2 との比較検証作業等を実施した。
- ・2022 年 1 月のトンガ火山噴火による成層圏エーロゾルへの影響について、大気海洋部にエーロゾルライダー観測情報を提供した（気候変動監視レポート 2022 に掲載予定）。

(2) 当初計画からの変更点（研究手法の変更点等）

(副課題1) 気象・気候予測のための地球システムモデリングに関する研究

今回のモデル開発では、大気モデルを入れ替えることに多くの手間や困難が見込まれるために、開発計画を再検討し、大気モデルの更新を主として行い、この変更に必要な他のコンポーネントの変更を行うのみとして、本中期計画内に MRI-ESM2 相当のパフォーマンスを持つ MRI-ESM3（MRI-ESM3.1）を完成することを目標とした。

(副課題2) マルチスケールに対応した海洋予測技術の開発に関する研究

変更なし。

(副課題3) 次世代海洋データ同化・大気海洋結合データ同化に関する研究

変更なし。

(副課題4) 全球数値予報モデル、季節予測システムに関する研究

変更なし。

(副課題5) 化学輸送モデル、大気微量成分同化に関する研究

変更なし。

(3) 成果の他の研究への波及状況

(副課題1) 気象・気候予測のための地球システムモデリングに関する研究

MRI-ESM2 ではモデル気候値の改善が著しいことから、十年規模気候予測システムや文科省「統合的気候モデル高度化研究プログラム」の「統合的気候変動予測」課題で開発する温暖化予測システムの基盤モデルとして MRI-ESM2 が採用された。また、定期開催の地球システムモデル利用者・開発者会合では、MRI-ESM の応用や活用促進の検討を行ってきている。

(副課題2) マルチスケールに対応した海洋予測技術の開発に関する研究

本課題で開発している気象研究所共用海洋モデル (MRI.COM) は、本庁の現業システムの基盤となっているほか、モデル貸与の枠組みを通じて部外の研究機関にも活用されており、のべ 20 件の貸与実績がある。また、文科省「統合的気候モデル高度化研究プログラム」や科研費などの外部資金における研究、海洋研究開発機構や北大等との共同研究においても広く使われている。また、全球海洋モデル (GONDOLA_100) の結果は、海洋モデルの国際比較研究 (OMIP) で活用されている。

(副課題3) 次世代海洋データ同化・大気海洋結合データ同化に関する研究

日本沿岸海況予測システムで作成したデータは、水産関係の研究機関や大学における研究で利用されており、これまでに 40 件以上の提供実績がある。

前中期計画より継続して開発した 4 次元変分法全球海洋データ同化システムおよび本研究計画で開発したアンサンブル初期値の作成手法は、第 3 世代季節予報システム (CPS3) のコンポーネントとして採用され、令和 4 年 2 月から業務運用されている。

海洋解析・予測システムや海洋観測値に関する評価に関しては、国際研究プロジェクト OceanPredict の観測システム評価タスクチームの活動、及び国連海洋科学 10 年の枠組みにおける、研究プロジェクト” Synergistic Observation Network for Relevant and Impactful Ocean Predictions” (SynObs) の一環としても進められる。

(副課題4) 全球数値予報モデル、季節予測システムに関する研究

新しい季節予測システム (CPS3) が昨年度に現業化され、季節予報の精度向上につながっている。CPS3 は各コンポーネント (大気モデル、海洋・海氷モデル、海洋・海氷同化など) の開発者と協力して開発を進めてきており、CPS3 の開発成果がこれらコンポーネントの改善としてフィードバックされている。

(副課題5) 化学輸送モデル、大気微量成分同化に関する研究

本課題で改良した地球システムモデルを推進費研究 (黄砂、BC) や科研費 (BC、CO₂、黄砂、オゾン)、地球一括 (光吸収性エアロゾル)、ArCS II 等に活用している。

本課題で改良した領域化学輸送モデルを推進費 (酸化能)、科研費、放調費等で活用している。

本課題で開発したエアロゾルデータ同化システムを JAXA のひまわりモニタに提供している。

本課題で開発した衛星 CO₂ 逆解析システムを GOSAT 研究公募課題に活用している。

本課題で開発した深層学習手法を科研費研究 (AI ダウンスケーリング) に活用している。

(4) 事前・中間評価の結果の研究への反映状況

事前評価結果の研究への反映状況は以下の通りである。「地球システムモデルの開発としてみた場合には、海氷及び陸面水文過程、エアロゾル・雲・降水・微物理のモデル開発が弱いという印象を受ける」というご意見を反映し、以下の対応を行った。海氷過程については、海氷パラメータの再設定を行ったほか、海氷内の塩分濃度を可変にするなど、海氷モデルの再現性向上に向けた取り組みを進めた。また、初期値となる海氷解析手法についても、現行の問題点の特定や改良に注力している。海氷過程については季節予測においても重要な要素であることから、海洋・海氷モデル、海洋・海氷同化、地球システムモデルの開発成果を活かしつつ、海氷過程の再現性はもちろんのこと、現業予測システムでは特に重要な計算安定性を考慮しながら、他の開発者と協力して開発を進めた。陸面水文過程については、陸面モデル開発チームを新設した。陸面水文過程に関するスキーム開発のために、所外の関係機関との連携をとりつつ、本格的な氷床モデルの導入なども含めた陸面モデル開発に取り組んでいる。また、気候モデルで重要な雲・降水・微物理過程のスキーム開発を進めるために、物理と化学モデルの連携を強めている。「化学輸送モデルとエアロゾルモデルのためのデータ作りや領域スケールの事例解析は P 課題と D 課題との連携が重要」との指摘に対して、これらの課題から M5 課題に研究担当者に入っていただくなど連携を強化している。「本研究において、P 課題との重複を恐れず、異なる視点でモデルの評価を行っていくことを望みたい」との指摘に対して、M 課題は全球～領域スケールで、P 課題はより細かいスケールでモデルの評価を行いつつ知見等の交換を進めている。「化学輸送モデル、大気微量成分同化に関する研究 (M5) と気候・地球環境度変動の要因解明と予測に関する研究 (C 課題) は、有機的に知見やデータを交換して研究を進めるべき」というご意見については、複数の研究者が両方の課題に

参画するなど、知見やデータの交換を進めている。

中間評価結果の研究への反映状況は以下の通りである。「海氷が数値予報や季節予報に対するインパクトについての研究を進めるべき」というご意見については、秋の北極域の海氷が冬のユーラシアの大気循環場に与える影響について調査を進めている。「大気海洋結合同化システムによる季節予報や気候変動予測などへの具体的な活用法」についても検討を進めている。また、研究と社会とのかかわりについてのご意見を踏まえて、報道発表を通じて積極的に成果の発信を心がけている。

今後の研究の進め方

(全体)

課題全体として概ね計画通り順調に進捗していることから、今後も計画通り研究を推進する。

(副課題1) 気象・気候予測のための地球システムモデリングに関する研究

- ・各コンポーネント開発グループは MRI-ESM3.1 の完成に向けて優先的に取り組み、成果の取りまとめとしてモデル記述論文または技術報告の作成を行う。並行して、各コンポーネントの新しい力学フレームや物理スキームの開発を進める。

(副課題2) マルチスケールに対応した海洋予測技術の開発に関する研究

- ・大気海洋結合モデル実験における大気場への海洋結合の影響評価の解析を進めるとともに、短期予報へ適用の可能性をさらに調べていく。
- ・温暖化予測の精度を高めるために、長期間積分する場合に海洋内部のバイアスが小さいとされる、新しい鉛直座標の導入も視野に入れたモデル開発を続ける。
- ・特に海氷部分においてプログラムの抜本的見直しをはかり、安定で堅牢な海氷モデルの作成をおこなう。さらに現状では一定値である海氷中の塩分濃度を可変にすることで、よりよい再現性を目指す。
- ・海面水位変動への解析は、感度実験などを引き続き行う。

(副課題3) 次世代海洋データ同化・大気海洋結合データ同化に関する研究

赤外サウンダ観測を利用した火山灰物質推定と、それに対応した散乱特性テーブルを用いたひまわり/GCOM-C の火山灰雲解析を継続して実施し、その結果をまとめる。X線マイクロ CT データより開発した霰・雪片モデルについてのレーダー偏波特性データベースの開発を継続して行う。雲・エアロゾル・放射に関連した、地上・衛星リモートセンシングプロダクトについて、概ね計画どおり順調に進捗している。今後も計画通り研究を推進する。地上エアロゾル光学特性等の連続観測及びデータ解析、分光日射観測システムの開発及び同システムを利用した連続観測を実施し、放射計校正技術の開発を継続する。

(副課題4) 全球数値予報モデル、季節予測システムに関する研究

- ・新しい季節予測システム CPS3 は昨年度に現業化され、今後は追加の感度実験を通じて、モデルの高解像度化や初期値作成の改良がどのように予測精度に影響したかなどを調べて、開発の過程で得られた知見も含め、取りまとめる。
- ・将来の季節予測システムの開発に資する研究を実施する。さらなるモデル高解像度化のインパクト、結合同化による結合プロセスの再現性向上の効果、アンサンブル手法の改善、線形オゾンパラメタリゼーションの導入など。また、オゾン等の地球システム要素を含むモデルによるフィジビリティ研究のための開発・整備を進める。

(副課題5) 化学輸送モデル、大気微量成分同化に関する研究

- ・引き続き、所内関係部門、所外研究機関等との連携を強化しつつ研究を発展させていく。大気微量成分（エアロゾル、オゾン、二酸化炭素）の数値予報への導入も積極的に取り組んでいく。

研究成果リスト

(1) 査読論文：50 件

1. Komatsu, K., Y. Takaya, T. Toyoda, and H. Hasumi, 2023: A submonthly scale causal relation between snow cover and surface air temperature on the autumnal Eurasian continent. *Journal of Climate*. (submitted)
2. Wada, R., S. Yonemura, A. Tani, and M. Kajino, 2023: Review: Exchanges of O₃, NO, and NO₂ between forest ecosystems and the atmosphere. *Journal of Agricultural Meteorology*, **79** 巻1号, 38-48.
3. Whaley, C. H., Law, K. S., Hjorth, J. L., Skov, H., Arnold, S. R., Langner, J., Pernov, J. B., Bergeron, G., Bourgeois, I., Christensen, J. H., Chien, R.-Y., Deushi, M., Oshima, N. et al., 2023: Arctic tropospheric ozone: assessment of current knowledge and model performance. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **23**, 637-661.
4. Kobashi, F., N. Usui, N. Akimoto, N. Iwasaka, T. Suga, and E. Oka, 2023: Influence of North Pacific subtropical mode water variability on the surface mixed layer through the heaving of the upper thermocline on decadal timescales. *Journal of Oceanography*. (in press)
5. Sekiyama, T. T., Y. Kurosaki, M. Kajino, M. Ishizuka, B. Buyantogtokh, J. Wu, and T. Maki, 2023: Improvement in dust storm simulation by considering stone coverage effects for stony deserts in East Asia. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, **128**, e2022JD037295.
6. Masuda, Y., Y. Yamanaka, S. Smith, T. Hirata, H. Nakano, A. Oka, H. Sumata, and M. Aita, 2023: Acclimation by diverse phytoplankton species determines oceanic carbon to nitrogen ratios. *Limnology & Oceanography*.
7. Fujii, Y. T. Yoshida, H. Sugimoto, I. Ishikawa, and S. Urakawa, 2023: Evaluation of a global ocean reanalysis generated by a global ocean data assimilation system based on a four-dimensional variational (4DVAR) method. *Frontiers in Climate*.
8. Takano, Y., et al., 2023: Simulations of Ocean Deoxygenation in the Historical Era: Insights from Forced and Coupled Models. *Frontiers in Marine Science*. (submitted)
9. Kawakami, Y., H. Nakano, S. L. Urakawa, T. Toyoda, K. Sakamoto, G. Yamanaka, and S. Sugimoto, 2023: Cold- versus warm-season-forced variability of the Kuroshio and North Pacific subtropical mode water. *Scientific Reports*, **13**, 256.
10. Kajino, M., A. Kamada, N. Tanji, M. Kuramochi, M. Deushi, and T. Maki, 2022: Quantitative influences of interannual variations in meteorological factors on surface ozone concentration in the hot summer of 2018 in Japan. *Atmospheric Environment*, **16** 巻, 100191.
11. Terao, T., et al., 2022: AsiaPEX: Challenges and Prospects in Asian Precipitation Research, *Bulletin of the American Meteorological Society*. (in press)
12. Gregory, J. M., J. S. Bloch-Johnson, M. P. Couldrey, E. Exarchou, S. M. Griffies, T. Kuhlbrodt, E. Newsom, O. A. Saenko, T. Suzuki, Q. Wu, S. Urakawa, and L. Zanna, 2022: A new conceptual model of global ocean heat uptake. *Climate Dynamics*. (submitted)
13. Khaykin, S., A. Podglajen, F. Ploeger, J. Grooß, F. Tence, S. Bekki, K. Khlopenkov, K. Bedka, L. Rieger, A. Baron, S. Beekmann, B. Legras, P. Sellitto, T. Sakai, J. Barnes, O. Uchino, I. Morino, T. Nagai, R. Wing, G. Baumgarten, M. Gerding, et al., 2022: Global perturbation of stratospheric water and aerosol burden by Hunga eruption. *Communications Earth & Environment*, **3**, 316.
14. Hirose, N., N. Usui, K. Sakamoto, N. Kohno, and G. Yamanaka, 2022: Superposition of coastal-trapped waves and Kuroshio warm water intrusions caused unusually high sea levels around the southern coasts of Japan in early September 1971. *Journal of Oceanography*, **78**, 475-493.
15. Doan, V.-Q., F. Chen, H. Kusaka, J. Wang, M. Kajino, and T. Takemi, 2022: Identifying a new normal in extreme precipitation at a city scale under warmer climate regimes: A case study of the Tokyo metropolitan area, Japan. *Journal of Geophysical Research*, **127** 巻21号, 036810.

16. Takaya, Y., H.-L. Ren, F. Vitart, A. W. Robertson, 2022: Current status and progress in the seasonal prediction of the Asian summer monsoon. *MAUSAM*. (submitted)
17. Adachi, K., Y. Tobo, M. Koike, G. Freitas, P. Zieger, and R. Krejci, 2022: Composition and mixing state of Arctic aerosol and cloud residual particles from long-term single-particle observations at Zeppelin Observatory, Svalbard. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **22**, 14421-14439.
18. von Salzen, K., Whaley, C. H., Anenberg, S. C., Dingenen, R. V., Klimont, Z., Flanner, M. G., Mahmood, R., Arnold, S. R., Beagley, S., Chien, R.-Y., Christensen, J., Eckhardt, S., Ekman, A. M. L., Oshima, N. et al., 2022: Clean air policies are key for successfully mitigating Arctic warming. *Communications Earth & Environment*, **3**, 222.
19. Kawai, H., K. Yoshida, T. Koshiro, and S. Yukimoto, 2022: Importance of Minor-Looking Treatments in Global Climate Models. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. (in press)
20. Iizuka, Y., Uemura, R., Matsui, H., Oshima, N., Kawakami, K., Hattori, S., Ohno, H., and Matoba, S., 2022: High Flux of Small Sulfate Aerosols During the 1970s Reconstructed From the SE-Dome Ice Core in Greenland. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, **127**, e2022JD036880.
21. Andrews, T., A. Bodas-Salcedo, J. M. Gregory, Y. Dong, K. C. Armour, D. Paynter, P. Lin, A. Modak, T. Mauritsen, J. N. S. Cole, B. Medeiros, J. J. Benedict, H. Douville, R. Roehrig, T. Koshiro, H. Kawai, T. Ogura, J.-L. Dufresne, R. P. Allan, and C. Liu, 2022: On the effect of historical SST patterns on radiative feedback. *Geophysical Research Letters*, **127**, e2022JD036675.
22. Xue, Y., I. Diallo, A. A. Boone, T. Yao, Y. Zhang, et al., 2022: Spring Land Temperature in Tibetan Plateau and Global-Scale Summer Precipitation - Initialization and Improved Prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*.
23. Ushijima, Y., H. Tsujino, K. Sakamoto, M. Ishii, T. Koshiro, N. Oshima, 2022: Effects of Anthropogenic Forcings on Multidecadal Variability of the Sea Level Around the Japanese Coast Simulated by MRI-ESM2.0 for CMIP6. *Geophysical Research Letters*, **49**, e2022GL099987.
24. Yukimoto, S., N. Oshima, H. Kawai, M. Deushi, and T. Aizawa, 2022: Role of Interhemispheric Heat Transport and Global Atmospheric Cooling in Multidecadal Trends of Northern Hemisphere Precipitation. *Geophysical Research Letters*, **49**.
25. Morgenstern, O., D. E. Kinnison, M. Mills, M. Michou, L. W. Horowitz, P. Lin, M. Deushi, K. Yoshida, F. M. O' Connor, Y. Tang, N. L. Abraham, J. Keeble, F. Dennison, E. Rozanov, T. Egorova, T. Sukhodolov, G. Zeng, 2022: Comparison of Arctic and Antarctic stratospheric climates in chemistry versus no-chemistry climate models. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, **127**, e2022JD037123.
26. Brown, F., G. A. Folberth, S. Sitch, S. Bauer, M. Bauters, P. Boeckx, A. W. Cheesman, M. Deushi, I. D. Santos, C. Galy-Lacaux, J. Haywood, J. Keeble, L. M. Mercado, F. M. O'Connor, N. Oshima et al., 2022: The ozone-climate penalty over South America and Africa by 2100. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **22**, 12331-12352.
27. Oshima, N., 2022: Benefits and Disbenefits Caused by Aerosols in the Climate System. *エアロゾル研究*, **37**, 189-200.
28. Wang, K.-Y., P. Nedelec, H. Clark, N. Harris, M. Kajino, and Y. Igarashi, 2022: Impacts on air dose rates after the Fukushima accident over the North Pacific from 19 March 2011 to 2 September 2015. *PLOS ONE*, **17** 巻8号.
29. Maki, T., T. Y. Tanaka, T. Koshiro, A. Shimizu, T. T. Sekiyama, M. Kajino, Y. Kurosaki, T. Okuro, and N. Oshima, 2022: Changes in Dust Emissions in the Gobi Desert due to Global Warming Using MRI-ESM2.0. *SOLA*, **18**, 218-224.
30. Zeng G., O. Morgenstern, J.H.T. Williams, F.M. O' Connor, P.T. Griffiths, J. Keeble, M. Deushi, L.W. Horowitz, V. Naik, L.K. Emmons, N.L. Abraham, A.T. Archibald, S.E. Bauer, B. Hassler, M. Michou, M.J. Mills, L.T. Murray, N. Oshima, L.T. Sentman et al., 2022: Attribution of stratospheric and tropospheric ozone changes between 1850 and 2014 in CMIP6 models. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, **127**, e2022JD036452.

31. Yamagami, A., M. Kajino, and T. Maki, 2022: Statistical evaluation of the temperature forecast error in the lower-level troposphere on short-range timescales induced by aerosol variability. *Journal of Geophysical Research*, **127** 巻13号, 036595.
32. Matsui, H., Mori, T., Ohata, S., Moteki, N., Oshima, N., Goto-Azuma, K., Koike, M., and Kondo, Y, 2022: Contrasting source contributions of Arctic black carbon to atmospheric concentrations, deposition flux, and atmospheric and snow radiative effects. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **22**, 8989–9009.
33. Usui, N., and K. Ogawa, 2022: Sea level variability along the Japanese coast forced by the Kuroshio and its extension. *Journal of Oceanography*, **78**, 515–527.
34. Vaittinada A., B., L. Bopp, J. R. Christian, T. Ilyina, J. P. Krasting, R. Seferian, H. Tsujino, M. Watanabe, A. Yool, J. Tjiputra, 2022: Contrasting projections of the ENSO-driven CO2 flux variability in the equatorial Pacific under high-warming scenario. *Earth System Dynamics*, **13**, 1097–1118.
35. Koshiro, T., H. Kawai, and A. T. Noda, 2022: Estimated cloud-top entrainment index explains positive low-cloud-cover feedback. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United State of America*, **119**, e2200635119.
36. Konsta, D., J.-L. Dufresne, H. Chepfer, J. Vial, T. Koshiro, H. Kawai, A. Bodas-Salcedo, R. Roehrig, M. Watanabe, and T. Ogura, 2022: Low-level marine tropical clouds in six CMIP6 models are too few, too bright but also too compact and too homogeneous. *Geophysical Research Letters*, **49**, e2021GL097593.
37. Hirahara, S., Y. Kubo, T. Yoshida, T. Komori, J. Chiba, T. Takakura, T. Kanehama, R. Sekiguchi, K. Ochi, H. Sugimoto, Y. Adachi, I. Ishikawa, and Y. Fujii, 2022: Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute Coupled Prediction System version 3 (JMA/MRI-CPS3). *Journal of the Meteorological Society of Japan*. (in press)
38. Hassan, T., R. J. Allen, W. Liu, S. Shim, T. van Noije, P. Le Sager, N. Oshima, M. Deushi, C. A. Randles and F. M. O’ Connor, 2022: Air quality improvements are projected to weaken the Atlantic Meridional Overturning Circulation through radiative forcing effects. *Communications Earth & Environment*, **3**, 149.
39. Nakano H., S. Urakawa, K. Sakamoto, T. Toyoda, Y. Kawakami, and G. Yamanaka, 2022: Long-term sea-level variability along the coast of Japan during the 20th century revealed by a 1/10° OGCM. *Journal of Oceanography*. (in press)
40. Adachi, K., N. Oshima, N. Takegawa, N. Moteki, M. Koike, 2022: Meteoritic materials within sulfate aerosol particles in the troposphere are detected with transmission electron microscopy. *Communications Earth & Environment*, **3**, 134
41. Whaley, C. H., Mahmood, R., von Salzen, K., Winter, B., Eckhardt, S., Arnold, S., Beagley, S., Becagli, S., Chien, R.-Y., Christensen, J., Damani, S. M., Dong, X., Eleftheriadis, K., Evangeliou, N., Faluvegi, G., Flanner, M., (略), Oshima, N., et al., 2022: Model evaluation of short-lived climate forcers for the Arctic Monitoring and Assessment Programme: a multi-species. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **22**, 5775–5828.
42. Kawakami, Y., H. Nakano, S. L. Urakawa, T. Toyoda, K. Sakamoto, H. Yoshimura, E. Shindo, and G. Yamanaka, 2022: Interactions between ocean and successive typhoons in the Kuroshio region in 2018 in atmosphere-ocean coupled model simulations. *Journal of Geophysical Research Oceans*.
43. Komatsu, K., Y. Takaya, T. Toyoda, and H. Hasumi, 2022: Response of Eurasian Temperature to Barents-Kara Sea Ice: Evaluation by Multi-Model Seasonal Prediction. *Geophysical Research Letters*.
44. Otaki T., H. Fudeyasu, N. Kohno, T. Takemi, N. Mori, K. Iida, 2022: Investigation of Characteristics of Maximum Storm Surges in Japanese Coastal Regions Caused by Typhoon Jebi (2018) Based on Typhoon Track Ensemble Simulations. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **100**, 661–676.

45. 松井仁志, 大畑 祥, 當房 豊, 松木 篤, 板橋秀一, 大島 長, 鈴木健太郎, 佐藤陽祐, 2023: 大気化学の将来構想 2022-2032: 各論第2集 7. エアロゾル・放射・雲「エアロゾル-放射・雲相互作用」. *大気化学研究*, **48**, 048A01.
46. 関山 剛, 梶野瑞王, 2023: アンサンブルカルマンフィルタにおける変数局所化 を利用した 気象場と大気濃度場の同時データ同化. *統計数理*, **70**(2), 165-179.
47. 丹羽洋介, 藤井陽介, 2022: 共役ベクトルと BFGS 公式を用いた解析誤差共分散行列の導出. *統計数理*, **70**, 195-208.
48. 藤井陽介, 吉田拓馬, 久保勇太郎, 2022: 変分法データ同化システムにおける BFGS 公式を利用したアンサンブルメンバーの生成について. *統計数理*, **70**, 209-233.
49. 向井苑生, 佐野 到, 中田真木子, Brent Holben, AERONET group, 今須良一, 岡本 渉, 梶野瑞王, 小林 拓, 齊藤保典, 佐藤陽祐, 清水 厚, 高見昭憲, 中口 譲, 西 典宏, 朴 虎東, 藤戸俊行, 松見 豊, 溝渕昭二, 宮原裕一, 森山達天喜, 2022: エアロゾル 集中観測 DRAGON/J-ALPS を終えて. *エアロゾル研究*, **37** 巻2号, 136-144.
50. 行本誠史, 2022: 気象研究所における気候モデルの歩み. *天気 (論文・短報)*, **69**, 299-317.

(2) 査読論文以外の著作物 (翻訳、著書、解説等) : 15 件

1. Yoden, S., and K. Yoshida, 2023: Impacts of Solar Activity Variations on Climate. In: Kusano, K. (eds) *Solar-Terrestrial Environmental Prediction.. Solar-Terrestrial Environmental Prediction*, 445-459.
2. Sakamoto, K., H. Nakano, S. Urakawa, T. Toyoda, Y. Kawakami, H. Tsujino, and G. Yamanaka, 2023: Reference Manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean Model version 5 (MRI.COMv5). *気象研究所技術報告*, **87**, 1-334. (in press)
3. Kohno N., C. Fritz, P. L. N. Murty, D. Greenslade, D. Telford, M. C. Uson, and S. Rabitu, 2022: Forecasting Tropical Cyclone Coastal and Marine Hazards and Impacts. .
4. Takaya, Y., L.-P. Caron, et al., 2022: Seasonal Tropical Cyclone Forecasting. *WMO 10th International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-10) Report*.
5. Deushi, M., 2022: Climate Impacts: Impacts of ozone on Southern Hemisphere climate. *Handbook of Air Quality and Climate Change*.
6. Takakura, T., K. Ochi, Y. Adachi, T. Komori, 2022: Assessing the feasibility for Atmosphere-Ocean Coupling of JMA' s Global Ensemble Prediction System. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Earth System Modelling*, **52**, 605-606.
7. Yamaguchi, H., Y. Adachi, S. Hirahara, Y. Ichikawa, T. Iwahira, Y. Kuroki, C. Matsukawa, R. Nagasawa, K. Ochi, R. Sekiguchi, T. Takakura, M. Ujiie, and H. Yonehara, 2022: Upgrade of JMA' s Global Ensemble Prediction System. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Earth System Modelling*, **52**, 609-610.
8. Kawai, H., T. Koshiro, and S. Yukimoto, 2022: Cloud feedbacks in MRI-ESM2. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Earth System Modelling*, **52**, 707-708.
9. 豊田隆寛, 坂本 圭, 豊田威信, 辻野博之, 浦川昇吾, 川上雄真, 山上晃央, 小松謙介, 山中吾郎, 谷川朋範, 中野英之, 2023: 気象研海洋モデルにおける海水熱力学過程の改良について. *月刊海洋*, **55**.
10. 石橋俊之, 2023: 大気解析のための変分法データ同化における背景誤差共分散行列の根の定式化. *統計数理*, 第 **70** 巻 第2号, 181-193. (in press)
11. 小林ちあき, 石川一郎, 2022: 季節予報モデルで予測された北半球中緯度の高温偏差. *気象研究ノート*第 **246** 号, 246, 73-79.
12. 相澤拓郎, 大島 長, 2022: 北極の気候変動の謎に挑む. *ArCS II ニュースレター*, **5**, 01-02.
13. 石井正好・森 信人, 2022: 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の開発と気候変動 リスク評価研究成果の社会実装-2021 年度岸保・立平賞受賞記念講演-. *天気*, **69**, 413-429.

14. 金谷有剛, 須藤健悟, Prabir Patra, 坂本陽介, 関谷高志, 藤縄 環, 谷本浩志, 江口菜穂, 齋藤尚子, 笠井康子, 出牛 真, 佐藤知紘, 2022: 大気化学の将来構想 2022-2032: 各論第1集 3. 反応性気体「大気汚染物質群の新たな科学: 化学理論の更新と排出-気候変動・健康問題の解決へ向けて」. 大気化学研究, **47**, 047A03.
15. 杉正人, 2022: 真鍋さんとの思い出・地球温暖化と台風の研究. 科学, **92**:5, 447-449.

(3) 学会等発表 : 71 件

ア. 口頭発表 : 48 件

・国際的な会議・学会等 : 23 件

1. Oshima, N., M. Deushi, T. Aizawa, and S. Yukimoto, Impacts of Short-lived Climate Forcers on the Arctic Climate by MRI-ESM2.0 and Multi-model Analyses, Seventh International Symposium on Arctic Research (ISAR-7), 2023 年 3 月, 東京都立川市
2. Usui, N, N. Hirose, Y. Fujii, and I. Ishikawa, Improvement of the ocean 4D-Var scheme for high-accuracy sea surface temperature analysis and forecast, International Symposium on Data Assimilation - Online, 2023 年 2 月, (オンライン)
3. Inoue, T., and T. T. Sekiyama, Development of a Temperature Prediction Method Combining Deep Neural Networks and a Kalman Filter, 103th Annual Meeting, 2023 年 1 月, USA, Denver
4. Fujii, Y., N. Hirose, Y. Kim, Y. Miyazawa, N. Usui, and N. Hirose, Ocean prediction systems in the western North Pacific and the adjacent marginal seas, Ocean Prediction Decade Collaboration Center Kick-off Meeting, 2023 年 1 月, オンライン
5. Fritz C., N. Kohno, P.L.N. Murty, D. Greenslade, D. Telford, M. C. Uson, and S. Rabitu, Coastal Inundation/ Storm Surge, 10th International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-10), 2022 年 12 月, インドネシア, バリ
6. Takaya, Y. and L. P. Caron, Seasonal Tropical Cyclone Forecasting, WMO 10th International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-10), 2022 年 12 月, インドネシア, デンパサール
7. Fujii, Y., N. Usui, and N. Hirose, Evaluation of Argo array impacts in the global and regional ocean data assimilation systems in JMA/MRI and the international collaboration through SynObs, SynObs キックオフワークショップ, 2022 年 11 月, つくば市
8. Yamagami, A., M. Kajino, T. Maki, and T. Toyoda, Synoptic-timescale variability of Arctic aerosol in three reanalyses and its relationship to the atmospheric circulation in summer., The 13th Symposium on Polar Science, 2022 年 11 月, 東京都
9. Yoshida, T., H. Sugimoto, Y. Kubo, S. Hirahara, T. Takakura, T. Komori, J. Chiba, T. Kanehama, R. Sekiguchi, K. Ochi, Y. Fujii, Y. Adachi, and I. Ishikawa, Ocean Initialization of the Coupled Prediction System Version 3 (CPS3) for Seasonal Forecasts, SynObs キックオフワークショップ, 2022 年 11 月, つくば市
10. Takaya, Y., and Y. Fujii, Importance of ocean observations for sub-seasonal to seasonal forecast in East Asia, SynObs キックオフワークショップ, 2022 年 11 月, つくば市
11. Fujii, Y., Synergistic Observing Network for Ocean Prediction (SynObs) Introduction, SynObs キックオフワークショップ, 2022 年 11 月, つくば市
12. Maki, T., Recent DSS related activities at the Meteorological Research Institute, The 15th Meeting of Working Group (I) for Joint Research on Dust and Sand Storms, 2022 年 11 月, 韓国, 済州
13. Maki, T., T. T. Sekiyama, N. Oshima, J. Ohtake, Y. Nagai, T. Y. Tanaka, M. Kajino, K. Yumimoto, and A. Shimizu, Current project and activities in Japan, 8th SDS-WAS Asian node RSG meeting, 2022 年 10 月, 韓国, 済州
14. Koshiro, T., H. Kawai, and A. T. Noda, Estimated cloud-top entrainment index explains positive low-cloud-cover feedback, 16th Conference on Cloud Physics, 2022 年 8 月, アメリカ, マディソン

15. Kawai, H., J. Chiba, and T. Koshiro, Simple parameterization of breakup processes of low clouds for GCMs, CFMIP Meeting on Clouds, Precipitation, Circulation, and Climate Sensitivity, 2022 年 7 月, アメリカ, シアトル
16. Koshiro, T., H. Kawai, and A. T. Noda, Estimated cloud-top entrainment index explains positive low-cloud-cover feedback, CFMIP Meeting on Clouds, Precipitation, Circulation, and Climate Sensitivity, 2022 年 7 月, アメリカ, シアトル
17. Takaya, Y., A. Minami, S. Iwasaki, Y. Imada, H. Kawase, Flow-dependent forecast skill in S2S time-scales, 2022 ASP workshop, 2022 年 7 月, アメリカ, ボルダー
18. Fujii, Y., and E. Remy, Co-design Experiences in the OceanPredict community, Ocean Decade Co-Design Workshop, 2022 年 6 月, オンライン, オンライン
19. Merryfield, W., J. Baehr, L. Batté, A. Beraki, L. Hermanson, D. Hudson, S. Johnson, J.-Y. Lee, F. Massonnet, Á. Muñoz, Y. Orsolini, H.-L. Ren, R. Saurral, D. Smith, Y. Takaya, and K. Raghavan, Some key challenges for subseasonal to decadal prediction research, EGU General Assembly 2022, 2022 年 5 月, Austria, Vienna
20. Fujii, Y., T. Yoshida, and Y. Kubo, Generation of oceanic perturbations using information on the gradient of the cost function in the JMA's new operational coupled prediction system, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
21. Kawai, H., T. Koshiro, and S. Yukimoto, How can the double-ITCZ problem be alleviated in climate models?, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
22. Kohno, N., S.M.Q. Hassan, and A. Hossain, Case study of storm surges by Bhola Cyclone in 1970, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
23. Fujii, Y., OceanPredict and its contribution to UN Decade for Ocean Science, 4D Virtual Ocean for Sustainable Development and Smart Application, 2022 年 5 月, オンライン

・国内の会議・学会等 : 25 件

1. 藤井陽介, 海洋予測研究と海洋観測ネットワークへの貢献, 「国連海洋科学の 10 年」シンポジウムー日本の大気・海洋科学のコミュニティがどう貢献できるか?ー, 2023 年 2 月, 千葉県柏市
2. 吉村裕正, 二重フーリエ級数を基底関数とした全球スペクトルモデルの改良, 第 36 回数値流体力学シンポジウム, 2022 年 12 月, (オンライン)
3. 広瀬成章, 岩崎俊祐, 碓氷典久, 坂本 圭, 石川一郎, 中野英之, 越前海岸で発生した 2022 年 8 月の急潮について, 日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会, 2022 年 12 月, 福岡県春日市
4. 川上雄真, 浦川昇吾, 坂本 圭, 豊田隆寛, 中野英之, 吉村裕正, 新藤永樹, 山中吾郎, 黒潮域における台風通過時の水温変化, 大気海洋相互作用に関する研究集会, 2022 年 11 月, 京都市
5. 大島 長, アイスコアと気象研究所地球システムモデルによるエアロゾル沈着量の長期変化, グリーンランド南東ドームアイスコアに関する研究集会, 2022 年 11 月, 北海道函館市
6. 佐藤寛通, 唐木達郎, 坂本 圭, 山中吾郎, 高木 力, 笠井亮秀, ファインメッシュモデルを用いた津軽海峡における流動構造の解析, 水産海洋学会創立 60 周年記念大会, 2022 年 11 月, 神奈川県横浜市
7. 神代 剛, 川合秀明, 野田 暁, 推定雲頂エントレインメント指標が正の下層雲量フィードバックを説明する, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
8. 行本誠史, 大島 長, 川合秀明, 出牛 真, 相澤拓郎, 北半球降水量の長期変化における半球間熱輸送と全球大気冷却の役割, 気象学会 2022 秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
9. 酒井 哲, 永井智広, 内野 修, 吉田 智, 小司禎教, 森野 勇, Richard Querel, Ben Liley, and Sergey Khaykin, トンガ火山噴火後につくばとニュージーランド・ローダーのライダーで観測された成層圏エアロゾル, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
10. 眞木貴史, 中村 貴, 現地観測と衛星観測データによる CO₂ 収支解析, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市

11. 川合秀明, 吉田康平, 神代 剛, 行本誠史, 全球気候モデルにおけるマイナーに見える取り扱いの重要性, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
12. 藤井陽介, 国際海洋科学の 10 年プロジェクト SynObs について, 日本海洋学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 9 月, 名古屋市&オンライン
13. 広瀬成章, 碓氷典久, 藤井陽介, 高野洋雄, 海面高度偏差と現場観測データを組合せた平均海面力学高度の推定, 日本海洋学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 9 月, 名古屋市&オンライン
14. 浦川昇吾, 中野英之, 豊田隆寛, 坂本 圭, 川上雄真, 気象研究所共用海洋モデルへの一般鉛直座標導入の試み, 日本海洋学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 9 月, 名古屋市&オンライン
15. 和川 拓, 井桁庸介, 坂本 圭, 竹内茉莉香, 奥山 忍, 阿部祥子, 矢部いつか, 遠く離れた日本海沖合域への沿岸水流出過程, 2022 年度日本海洋学会秋季研究発表大会, 2022 年 9 月, 名古屋
16. 中野英之, 浦川昇吾, 豊田隆寛, 川上雄真, 坂本 圭, 碓氷典久, 広瀬成章, 石川洋一, 五十嵐弘道, 杉山 徹, 黒木聖夫, 西川 悠, 西川史朗, 牛島悠介, 水田 亮, 辻野博之, 日本近海の近未来大アンサンブルデータの作成について, 日本海洋学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 9 月, 名古屋市
17. 平原翔二, 久保勇太郎, 吉田拓馬, 小森拓也, 千葉丈太郎, 高倉寿成, 金浜貴史, 杉本裕之, 足立恭将, 石川一郎, 藤井陽介, 大気海洋結合予測システム JMA/MRI-CPS3 による 季節内～季節規模変動予測, 日本海洋学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 9 月, 名古屋市&オンライン
18. 豊田隆寛, 浦川昇吾, 相木秀則, 中野英之, 新藤永樹, 吉村裕正, 川上雄真, 坂本 圭, 山上晃央, 原田やよい, 小林ちあき, 富田裕之, 大気海洋結合予測実験における熱帯不安定波について, 日本海洋学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 9 月, 名古屋市
19. 辻野博之, 海洋気候モデリングにおける黒潮: 回顧と展望, 日本海洋学会 2022 年度秋季大会シンポジウム 3 「黒潮大蛇行研究 –これまでの歩みと今後の展望–」, 2022 年 9 月, 名古屋市&オンライン
20. 豊田隆寛, 坂本 圭, 豊田威信, 辻野博之, 浦川昇吾, 川上雄真, 山上晃央, 小松謙介, 中野英之, 気象研海洋モデル開発における海水熱力学過程の改良について, 日本周辺の海流の力学過程およびその影響の理解 (大槌シンポジウム海洋パート), 2022 年 8 月, 大槌町
21. 川上雄真, 浦川昇吾, 坂本 圭, 豊田隆寛, 中野英之, 吉村裕正, 新藤永樹, 山中吾郎, 黒潮域における台風通過時の水温変化, 東京大学大気海洋研究所国際沿岸海洋研究センター研究集会 (大槌シンポジウム) 「日本周辺の海流の力学過程およびその影響の理解」, 2022 年 8 月, 大槌町
22. 川合秀明, 地球の温度上昇予測に大きなばらつきがあるのはなぜか? –答えは, 雲–, 日本気象学会第 56 回夏季大会, 2022 年 8 月, オンライン
23. 豊田隆寛, 北村佳照, 道東の海氷変動と大規模大気・海洋場との関係について, 知床とオホーツク海の海氷–海洋–物質循環–生態系の連関と変動, 2022 年 6 月, 札幌市
24. 坂本 圭, 中野英之, 豊田隆寛, 浦川昇吾, 川上雄真, 辻野博之, 気象研究所共用海洋モデル「MRI.COM」の開発状況 (2): v5.0 の公開, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
25. 新藤永樹, 水惑星実験及び AMIP 実験による ITCZ と長波雲放射効果の関係について, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン

イ. ポスター発表: 23 件

・国際的な会議・学会等: 10 件

1. Maki, T., T. T. Sekiyama, K. Kondo, K. Ishijima, K. Tsuboi, and T. Nakamura, Introduction of Satellite Observation Data with Independent Bias Correction Method to Carbon flux Inverse Analysis, WMO International Greenhouse Gas Monitoring Symposium, 2023 年 1 月, スイス, ジュネーブ
2. Yoshida, T., H. Sugimoto, Y. Fujii, T. Takakura, Y. Kubo, T. Komori, I. Ishikawa, and T. Toyoda, A New Operational Ocean-Sea Ice Coupled Analysis System with Four-Dimensional Variational Method (MOVE-G3), AGU Fall Meeting 2022, 2022 年 12 月, アメリカ, シカゴ
3. Usui, N., N. Hirose, Y. Fujii, and N. Kohno, Impact of the assimilation of simulated wide-swath altimeter data in a regional eddy-resolving assimilation system at JMA/MRI, SynObs キックオフワークショップ, 2022 年 11 月, つくば市

4. Koshiro, T., H. Kawai, and A. T. Noda, Estimated cloud-top entrainment index explains positive low-cloud-cover feedback, 6th WGNE workshop on systematic errors in weather and climate models, 2022 年 11 月, イギリス, レディング
5. Hirose, N., N. Usui, and Y. Fujii, A new method for estimating steric mean sea surface dynamic height in MOVE system combining in-situ profiles and sea level anomalies, OSTST2022, 2022 年 11 月, イタリア, ベネチア
6. Kawai, H., K. Yoshida, T. Koshiro, and S. Yukimoto, Importance of Minor-Looking Treatments in Global Climate Models, 6th WGNE workshop on systematic errors in weather and climate models, 2022 年 11 月, イギリス, レディング
7. Yoshida, K., The polar stratosphere-troposphere coupling variation with El Niño Southern Oscillation and Quasi-Biennial Oscillation in large-ensemble simulations, SPARC 2022 7th General Assembly (GA), 2022 年 10 月, オンライン (ボルダー、レディング、青島)
8. Kawai, H., J. Chiba, and T. Koshiro, Simple parameterization of breakup processes of low clouds for GCMs, 16th Conference on Cloud Physics, 2022 年 8 月, アメリカ&オンライン, マディソン&オンライン
9. Kawai, H., K. Yoshida, T. Koshiro, and S. Yukimoto, Importance of “Minor Treatments” in Global Climate Models, The 3rd Pan-GASS meeting, 2022 年 7 月, アメリカ, モントレー
10. Usui, N., Y. Fujii, N. Hirose, and N. Kohno, Improvement of the ocean 4D-Var scheme for accurate sea surface temperature analysis, JpGU meeting 2022, 2022 年 6 月, 千葉県千葉市&オンライン

・国内の会議・学会等：13 件

1. 藤井陽介, アルゴフロート品質管理の海洋データ同化システムに対するインパクトの検証, 第 13 回データ同化ワークショップ, 2023 年 2 月, 兵庫県神戸市
2. 藤井陽介, 中野慎也, 気象庁・気象研海洋データ同化システムにおけるアルゴフロート観測データのインパクト調査, 2022 年度 ROIS-DS 成果発表会, 2023 年 2 月, オンライン
3. 足立恭将, 直江寛明, 久保勇太郎, 小寺邦彦, 中緯度海洋前線の予測への影響評価ー冬季の大西洋領域の季節内予測ー, Hotspot2 領域全体会議ポスターセッション, 2022 年 11 月, オンライン
4. 碓氷典久, 広瀬成章, 黒潮続流と同期した日本海貯熱量の十年規模変動, Hotspot2 領域全体会議ポスターセッション, 2022 年 11 月, オンライン
5. 佐藤寛通, 唐木達郎, 坂本 圭, 山中吾郎, 高木 力, 笠井亮秀, 高解像度モデルを用いた津軽海峡における流動構造の季節変動の解析, 超異分野学会 北海道フォーラム 2022, 2022 年 11 月, 札幌
6. 足立恭将, 直江寛明, 久保勇太郎, 小寺邦彦, 中緯度海洋前線の予測への影響評価ー2020 年 2 月の大西洋サイクロン事例ー, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, オンライン
7. 佐藤利典, 鈴木雅博, 村田耕一, 碓氷典久, 塩原 肇, 山田知朗, 篠原雅尚, MSSA 解析とパラメトリック関数のフィッティングを併用した海洋モデルを用いた海底圧力計からのスロースリップによる変動の抽出, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 北海道札幌市
8. 川上雄真, 浦川昇吾, 坂本 圭, 豊田隆寛, 中野英之, 山中吾郎, 杉本周作, 寒候期の気象強制による黒潮流量と亜熱帯モード水形成のコントロール, 2022 年度日本海洋学会秋季研究発表大会, 2022 年 9 月, 名古屋
9. 藤井陽介, 国連海洋科学 10 年プロジェクト SynObs とアルゴフロートの塩分ドリフトを対象とした観測システム実験, JpGU meeting 2022, 2022 年 6 月, 千葉県千葉市&オンライン
10. 高野洋雄, 対馬弘晃, 林 豊, Entel Mikhail, トンガ火山噴火に伴う潮位振動について, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
11. 杉山 徹, 西川史郎, 黒木聖夫, 西川 遥, 辻野博之, 坂本 圭, 石川洋一, 低次生態系を含めた北太平洋域の海洋将来予測データセットの作成, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン

12. 伊藤大樹, 川口悠介, 和川 拓, 坂本 圭, 対馬暖流のフロントジェネシスー乱流スケール現象への影響ー, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
13. 山上晃央, 梶野瑞王, 眞木貴史, 北極でのエアロゾルの変動と循環場の関係, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, 東京

(4) 投稿予定論文：2 件

1. Toyoda, T., K. Sakamoto, T. Toyota, H. Tsujino, L. S. Urakawa, Y. Kawakami, A. Yamagami, K. K. Komatsu, G. Yamanaka, T. Tanikawa, and H. Nakano: Improvements of sea ice thermodynamics with variable sea ice salinity and melt pond parameterizations in an OGCM. Ocean Modelling, (prepared).
2. Kawakami, Y., H. Nakano, L. S. Urakawa, T. Toyoda, K. Sakamoto, S. Nishikawa, Y. Ishikawa, G. Yamanaka, K. Sato, and S. Sugimoto: Future projection of marine heatwaves in the northwestern Pacific Ocean from ensemble simulations with a high-resolution ocean general circulation model. to be submitted to Geophysical Research Letters.

報道・記事

- ・令和 4 年 4 月「20 世紀中頃の北極寒冷化は人間活動による大気中の微粒子の増大と気候の自然変動が複合的に影響 ～北極温暖化の将来予測の信頼性向上に貢献～」(国立極地研究所他)
- ・令和 4 年 7 月「対流圏で採取したエアロゾル粒子から隕石由来の物質を電子顕微鏡分析で検出し、それらが成層圏から流れていることを示しました」(気象研)
- ・令和 4 年 8 月「物理的な推定指標を用いて下層雲による温暖化の増幅が説明できることを示しました」(海洋研究開発機構他)
- ・令和 4 年 9 月「1970 年代の硫酸エアロゾルの粒径復元にはじめて成功 ～硫酸エアロゾルが雲をつくる作用の解明による、地球温暖化メカニズム研究の進展に期待～」(北海道大学他)

その他((3) 「成果の他の研究への波及状況」関連)

- ・本課題で開発した海氷同化・予測手法を導入した日本沿岸海況監視予測システムによる海氷予測情報が令和 3 年 12 月から配信された。
- ・本課題で本庁と共同開発した季節予測システム(CPS3)が、令和 4 年 2 月に本庁で運用を開始した。
- ・本課題で本庁と共同で開発したオゾンデータ同化システムを用いて、本庁が JRA-3Q 用オゾン解析値の作成を行った。
- ・本課題で開発した二酸化炭素衛星逆解析システムが令和 5 年度末に本庁の二酸化炭素分布情報にて運用を開始する予定である。

P 大気の物理過程の解明とモデル化に関する研究

研究年次：4年目／5年計画（令和元年度～令和5年度）

研究代表者：山田雄二（気象予報研究部長／令和元年度～令和3年度）
高槻 靖（気象予報研究部長／令和4年度）

課題構成及び研究担当者

（副課題1）高解像度非静力学モデルによる激しい気象現象の再現性向上

副課題代表者：藤田 匡（気象予報研究部 第一研究室長）

〔気象予報研究部〕橋本明弘、林 修吾、渡邊俊一

〔台風・災害気象研究部〕辻野智紀

〔客員研究員〕伊藤純至

（副課題2）接地境界層における乱流輸送スキームの精緻化

副課題代表者：毛利英明（気象予報研究部 第三研究室長）

〔気象予報研究部〕水野吉規、守永武史、大野知紀（7月から）、

〔客員研究員〕伊藤純至、萩野谷成徳

（副課題3）雪氷圏の監視・変動要因解明とその基盤技術の開発

副課題代表者：大河原望（気象予報研究部 第四研究室長）

〔気象予報研究部〕谷川朋範、庭野匡思

〔全球大気海洋研究部〕豊田隆寛

〔気候・環境研究部〕保坂征宏

〔併任：本庁大気海洋部〕酢谷真巳、長屋幸一、白野和浩、野村幸弘、高橋直子、三浦甚哉、
赤尾和紀、小野文睦、小室光仙

〔客員研究員〕島田利元

（副課題4）積雲対流スキームのグレイゾーン対応と雲・放射スキームの精緻化

副課題代表者：中川雅之（気象予報研究部 第二研究室長）

〔気象予報研究部〕川合秀明、長澤亮二

〔全球大気海洋研究部〕吉村裕正、新藤永樹

〔台風・災害気象研究部〕和田章義

（副課題5）エアロゾル・雲・降水微物理の素過程解明と微物理モデルの開発

副課題代表者：折笠成宏（気象予報研究部 第五研究室長）

〔気象予報研究部〕田尻拓也、岩田 歩、橋本明弘

〔全球大気海洋研究部〕梶野瑞王、足立光司

〔応用気象研究部〕川端康弘

〔客員研究員〕村上正隆

研究の動機・背景 ※現状、問題点、研究の必要性及び緊急性についても記載

（社会的背景・意義）

近年、集中豪雨や台風等による被害が相次いで発生しており、また雨の降り方が局地化、集中化、激甚化していることから、国土交通省では平成27年1月、「新たなステージに対応した防災・減災のあり方」をとりまとめた。これを受けて、交通政策審議会気象分科会では、防災・減災のためにソフト面から気象庁が取り組むべき事項を審議し、平成27年7月に「「新たなステージ」に対応した防災気象情報と観測・予測技術のあり方」を、気象庁への提言としてとりまとめた。この中では、新たなステージに対応できるよう、おおむね10年先を見据えた観測・予測技術の高度化が求められている。

引き続いて同分科会では、上の提言のフォローアップとして、平成30年8月に「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」という、気象庁への提言をとりまとめた。ここでは「現在の気象状況から100年先まで、社会ニーズに応じた観測・予測の高精度化」が目標として掲げられており、「社会的ニーズに応じた観測・予測」の具体例として集中豪雨、台風、季節予報、温暖化予測があげられている。

これらの予測の基盤技術は数値予報モデルであり、予測精度の向上には数値予報モデルの改善が必要である。数値予報モデルは大気の運動や状態変化のシミュレーションであるから、大気の様々な物理プロセスの再現性がその予測精度を大きく左右する。

(学術的背景・意義)

集中豪雨や短時間強雨、突風などの激しい気象現象は一般的に時間空間スケールが小さく、積乱雲が関与していることが多い。したがって、これらの現象の予測精度を向上させるためには、積乱雲を精度良く再現する高解像度の非静力学モデルを開発していくことが求められている。気象研究所では高解像度化が予測精度に与える影響を調べてきたが、必ずしも高解像度化が予測精度向上に結びつくわけではないことが分かっている。これは「グレーゾーン問題」がその一因である。したがって、モデルの高解像度化に伴う問題点を精査し、それを解決するための新たな物理過程スキームを提案することは、今日のモデル開発における国際的な課題となっている。

エアロゾルは、降水に影響を与える雲形成プロセスにおいて、雲核 (CCN)、氷晶核 (IN) として作用し、また放射を直接的に散乱・吸収する。これらのエアロゾルのプロセスは現在の予報モデルでは考慮されていないが、雲の出現特性や降水、放射過程の予報精度を高めるためには、将来的に重要性が増すと考えられる。特に IN や光吸収性の粒子については未解明部分が多い。そのため、地上モニタリング観測による IN 数濃度の変動特性や、実際に大気中で IN として働くエアロゾル粒子、黒色炭素やブラウンカーボンなど光吸収性粒子の物理化学特性の把握は重要である。また現実のエアロゾルの多くは内部混合であり、その特性について基礎的な研究が必要である。これまで気象研究所では連続モニタリングや雲生成チェンバー実験、顕微鏡的手法による粒子解析で各種エアロゾルの IN 能、CCN 能、物理化学特性を調査し、それらを基にボックスモデルの構築を行ってきたが、これをさらに継続発展させ、数値予報モデルの中でエアロゾルの影響を考慮できるようにする必要がある。

台風は、広範な領域に局地的な豪雨や強風をもたらして甚大な災害を発生させる場合がある。このような被害を軽減するためには、単に台風の進路を予測するだけでなく、台風による雨や風の予測を改善することが重要となる。このためには、広域で運用できる高解像度モデルを開発し、その利用可能性を検討する必要がある。

気象研究所では現業モデルのための境界層過程を作成し、さらに運動量や顕熱の地表面フラックス評価法を改良して実装してきた。世界的には、過去数年間で中立な接地境界層の相似則について理解が進展した結果、次の課題として安定・不安定成層における相似則や粗度の取り扱いを再検討し、その成果を Large Eddy Simulation (LES) や気象モデルに取り込む機運が高まっている。現在の気象庁のモデルによる地上気象予測は、特に強安定・強不安定で精度が高くないので、平成 30 年夏季のような災害的な猛暑を適切に予測するために接地境界層過程を精緻化する必要がある。

季節予報や地球温暖化予測に用いられる全球モデルの改善のために、これまで層積雲スキームや積雲対流スキームの改良に取り組んできた。長期の予測では放射収支が重要な役割を果たすことを踏まえると、さらに部分雲の表現や放射のアルゴリズムを精緻化する必要がある。また、雪氷圏はアイスアルベドフィードバックのもと、気候変動に対して脆弱であることを踏まえ、これまで測器の開発や継続的なモニタリング、および積雪物理モデルの構築を行ってきた。モニタリングを継続するとともに、数値予報モデルにおける雪氷面と大気との相互作用を精緻化することが重要である。

(気象業務での意義)

上記の提言を踏まえて、気象庁では「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」を策定し、平成 30 年 10 月に公開した。ここでも、主たるターゲットは集中豪雨、台風、2 週間から半年程度先までの予測（社会経済活動への貢献）、温暖化への適応策である。上に述べたとおり、数値予報技術の改善の根幹には、個々の物理プロセスの再現性向上がある。

研究の目的

(全体)

観測や実験と数値シミュレーションを組み合わせることで大気の種類物理過程を解明し、それを数値予報モデルに反映させることによって、集中豪雨、台風の予測、季節予報、地球温暖化予測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) 高解像度非静力学モデルによる激しい気象現象の再現性向上

高解像度非静力学モデルにより局地的な激しい現象の再現性を向上させる。このモデルを広領域で実行して、フィリピン域や北西太平洋域での降水量や風の予測精度を向上させる。

(副課題2) 接地境界層における乱流輸送スキームの精緻化

気象庁現業領域モデル (asuca) の接地境界層過程を精緻化して地上気象予測の精度を改善する。

(副課題3) 雪氷圏の監視・変動要因解明とその基盤技術の開発

放射伝達理論等の物理過程に基づき、雪氷面の観測を行い、雪氷圏変動の実態把握を行う。その状態変化に係るモデル化を進め、予測精度向上に寄与する。

(副課題4) 積雲対流スキームのグレイゾーン対応と雲・放射スキームの精緻化

数値予報モデルの積雲対流、部分雲、放射スキームを精緻化し、予測精度向上に寄与する。

(副課題5) エアロゾル・雲・降水微物理の素過程解明と微物理モデルの開発

エアロゾルの物理化学特性を解明し、また、雲の生成から降水に至る物理過程を精緻化することにより、降水や放射の予測精度向上に寄与する。

研究の目標

(全体)

現業数値予報モデルで使用されている各種物理過程の問題点を明らかにし、有効な改善方法を提案する。あわせて、モデルの高解像度化と領域モデルの広域化について利用可能性を評価し、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) 高解像度非静力学モデルによる激しい気象現象の再現性向上

高解像度モデルの予測精度の解像度依存性について評価して問題点を抽出し改善の方策を示すとともに、高解像度モデルに適した力学フレームを検討する。広領域で実行可能な高解像度領域モデルを開発し、台風による局地的な降水や風の予測精度を評価して問題点の抽出と改善のための方策を示す。また、他副課題で得られた物理過程改良の成果を現業数値予報モデルを用いて総合的に確認し、予報精度向上にかかる改善の提案を目指す。

(副課題2) 接地境界層における乱流輸送スキームの精緻化

接地境界層における運動量・熱などの乱流輸送の特性を①数値計算②風洞実験③野外観測から明らかにする。得られた知見を総合的に検討して気象庁領域モデル (asuca) に接地境界層過程として実装する乱流輸送スキームを精緻化し、副課題1と連携して、数値予報におけるインパクトを確認する。

(副課題3) 雪氷圏の監視・変動要因解明とその基盤技術の開発

観測のための測器等を開発・整備しつつ、地上観測・試料分析を継続して高精度な長期監視を行うとともに、未だに十分な理解が進んでいない雪氷の物理過程の解明を行う。これを衛星リモートセンシングアルゴリズムの開発・改良に活かし、時空間的に連続的かつ広域にわたる、量的・質的な雪氷圏監視を行う。また、積雪モデルや海水モデルの開発・改良を進め、これらを大気モデルに結合させることで大気と雪氷面の相互作用を精緻化し、雪氷面の状態変化に係る予測精度を向上させる。

(副課題4) 積雲対流スキームのグレイゾーン対応と雲・放射スキームの精緻化

メソモデルによる顕著現象などの予測精度向上や、将来の全球モデルの水平高解像度化に向け、水平格子間隔約 10km からそれ以下のグレイゾーンに対応した積雲対流スキームを提案する。また、格子内の部分雲の表現を改善、および雲が放射に及ぼす効果を改善するなど雲・放射全般の改善を図る。これらに関連する課題・副課題と連携し、研究成果を数値予報モデルに適用して、予測精度を向上させる。

(副課題5) エーロゾル・雲・降水微物理の素過程解明と微物理モデルの開発

電子顕微鏡による大気エアロゾル粒子の個々のレベルでの分析により、存在状態や物理化学特性などを明らかにする。また、雲生成チェンバー等の装置を用いた実験、各種大気エアロゾルのモニタリング観測、新たに開発する詳細微物理モデルによる数値実験の結果を用いて、CCN 能、IN 能の定量的なモデル化を進める。さらに航空機観測データ等も用いて、雲・降水プロセス全般について検討を行い、3次元モデル用の新たな雲物理モデリングの提案を行なって、降水や放射予測精度向上に向けた改善点を明らかにする。

研究成果**(1) 今年度得られた成果の概要**

(全体)

数値予報モデルで使用されている各種物理過程について、観測や実験と数値シミュレーションを組み合わせた解析・評価を計画に沿って進めた。予測精度のモデル解像度依存性の検証のため、NHM、asuca による高解像度の系統的实验を実施しその評価を行ったほか、激しい気象現象の再現性の検証・予測精度の評価等を進めた。接地境界層における乱流輸送スキームに関連して、風洞実験と露場観測から得られたデータに基づいた地表面フラックス評価の精緻化を行った。雪氷物理量を精密に測定するための技術開発を進め連続観測を継続して行うとともに、積雪変質モデル SMAP や海洋モデル用海氷アルベド物理モデルの改良やその応用等を進めた。積雲対流スキーム・層積雲スキームの開発や雲微物理過程の改良、放射スキームの改良等を進めた。エーロゾルの雲核能・氷晶核能の解析や詳細微物理モデル、雲スキームの開発等を進めた。また、以上の成果を適宜本庁や関連課題に提供した。

(副課題1) 高解像度非静力学モデルによる激しい気象現象の再現性向上**①系統的实验による予測精度のモデル解像度依存性の検証**

- ・NHM、asuca による系統的实验を行い、予測精度のモデル解像度依存性の調査に取り組んだ。令和2年7月豪雨事例について、モデルでは、30mm/h 以上の強雨の出現頻度が実況と比較して過剰であった。特に NHM では 1 km 以下の解像度で改善が見られる一方で、asuca では高解像度においても強雨が過剰傾向のままであった。これらのモデルによる強雨の出現環境を調べたところ、地形や海陸による偏りや単一格子への集中は見られなかった。一方、ごく下層で気圧低下、収束強化が伴う傾向がみられた。令和元年12月と令和2年1月の豪雪事例について、積算降水量で概ね実況に対応する分布が再現されたものの、水平格子間隔 500, 250m の asuca では弱い降水が過少であった。
- ・NHM、asuca について、研究用途での入力データへの対応機能の整備や、現業数値予報システムの更新への気象研究所実験環境の対応などを行った。

②激しい気象現象の再現性の検証および予測精度の評価

- ・日本海側の大雪事例における数値実験を行い、素過程追跡スキームにより地上降水に対する各素過程の寄与を調べた。地上降水に対する昇華成長の温度別寄与率は、地上気温と対応がみられた。JPCZ やその南側の筋状雪雲域など比較的強い対流がある場所では雲水が分布し、雲粒捕捉の寄与率が大きかった。
- ・東京スカイツリーの雲粒子観測点における雲粒数濃度観測について、モデルによる再現実験を行った。雲粒数濃度の再現性は、雲物理過程の、雲凝結核過飽和度スペクトルのパラメータ値に依存しており、その最適値は事例によって異なることが示唆された。
- ・積乱雲中での詳細な雷の発生分布とその時間的推移を把握するため、雷放電経路三次元観測システムによる観測データの整備、解析に取り組み、モデルによる再現性について検討した。モデルによる再現では雲物理、とくに氷相過程がより精緻化され現実的であるほど、雷の再現性も向上することが明らかとなった。
- ・LES 実験を用いた線状降水帯の理想化実験の分析を進めた。LES の結果を空間フィルタで平滑化し、フラックスをフィルタースケールとサブフィルタースケールに分解した。フィルタースケールの

値から物理過程パラメタリゼーションによりサブフィルタースケールのフラックスを診断した結果との比較を行った。解像度に応じた雲乱流の物理過程パラメタリゼーションに向けて、サブフィルタースケール輸送のスケール相似則に基づいた近似について検討した。スケール相似則に基づく新たな定式化のほうが、より精度よくサブフィルタースケールの輸送を表現することがわかった。

- ・南岸低気圧に伴う降水の事例で水平格子間隔 1 km の再現実験を行った。解析雨量におけるブライトバンドと、モデルによる融解層付近の雲物理量から診断した分布の比較を行い、両者の分布および時間発展が良く対応づけられる結果が得られた。
- ・水平格子間隔 200m で、ヒマラヤ域における局地気象の表現を地上自動観測との比較により調査した。水平格子間隔 1km と比較して局地風系、降水量の再現性が高い結果が得られた。また、降水日変化において日中午後のピークと比較して夜間の降水のピークの再現性に課題があることが分かった。
- ・グリーンランドにおける強風事例の水平格子間隔 1km での再現実験を行った。強風がモデルによって再現されることを確認し、風速場をもとに後方流跡線解析を実施した。強風がおろし風のメカニズムで生じていること、同方向の地衡流を生じる気圧パターンと同期していることが分かった。
- ・高解像度モデルによる大規模アンサンブルダウンスケーリング実験を行い、将来における線状降水帯の発生について調査した。下層水蒸気量が増加することにより、将来線状降水帯の発生頻度が増加する結果が得られた。発生域も現在より北方まで広がり、個々の線状降水帯による降水量も増加する傾向がみられた。
- ・高解像度モデルによる大規模アンサンブルダウンスケーリング実験により、渦状擾乱の将来変化について調査した。渦状擾乱は JPCZ 周辺と北海道西方を中心に減少する傾向がみられた。SST より大気の上昇が強く成層が安定化することが寄与していると考えられる。また、総観スケールの循環場の変化も渦状擾乱の減少に寄与していると考えられる。
- ・水平格子間隔 1 km の asuca により東日本・北日本の大雨事例の再現を行い、地形に関する感度実験や NHM との比較を行った。冬季に関東を低気圧が通過した事例では、解像度や地形標高を高めることで寒気がより滞留し、収束帯の位置が現実になることがわかった。北東北の線状降水帯事例は、水平格子間隔 1 km の NHM で再現が比較的うまくできたが、同一設定の asuca では再現できなかった。

③広領域の高解像度モデルによる台風予測の精度検証

- ・2020 年台風第 10 号について、水平格子間隔 2 km による asuca による数値シミュレーションを行ったところ、鉛直層増強（モデル上端高度引き上げ）により、台風の急激な発達への再現性が向上した。これについて台風の内部構造を分析し、上部暖気核が強化され、台風の発達が強まっていることが分かった。海面水温を固定した当初の設定で鉛直層増強のみを行うと台風は過発達となったが、さらに海洋結合を行うと過発達は抑制され、ベストトラックに近い結果が再現された。

(副課題 2) 接地境界層における乱流輸送スキームの精緻化

最終年度にむけて①数値計算②風洞実験③野外観測の各分野で成果が順調に蓄積されつつある。とくに風洞実験と露場観測から得られたデータに基づいた地表面フラックス評価の精緻化が完了し、Large Eddy Simulation や気象モデルへの実装作業を開始した。

なお本課題からは大気境界層乱流について以下の学術的知見を得て論文として発表・投稿している。

- ②大型風洞装置で不安定な境界層乱流を生成し、運動量フラックスの振舞が中立時からどのように変化するか明らかにした (Mizuno et al. 2022a, 2022b)。
- ②回転実験装置に開水路を設置し、回転渦の発生条件や流れの性質がロスビー数等のパラメータにどのように依存するか調べた (Mizuno et al. 投稿中)。
- ③通年観測で得られた露場観測データを風洞実験データと比較して運動量フラックス変動の高度依存性を明らかにした (Mouri and Ito 投稿中)。

(副課題 3) 雪氷圏の監視・変動要因解明とその基盤技術の開発

①雪氷物理量を測定するための技術開発、連続観測

- ・北海道でアメダス積雪深計を 2 か所新設して観測を開始し、観測データを活用した積雪変質モデルを組み込んだ本庁システムの改良への協力を行った。
- ・札幌・北見・長岡における放射・気象・積雪観測および現地で取得した積雪サンプルからの光吸収性不純物濃度測定を計画通り実施した。
- ・積雪内光吸収性不純物の混合状態を抽出するための技術開発に着手した。

- ・海氷面の反射・透過特性の精緻化を行い、大気-積雪/海氷放射伝達モデルの高度化を行った。
- ②リモートセンシングによる雪氷物理量の監視、アルゴリズム開発・改良
 - ・偏光リモートセンシングによる雪氷面上大気エアロゾル観測の可能性を調査するため、大気-積雪放射伝達モデルによる感度解析を行い、ダスト情報を推定できる可能性を示唆する結果を得た。
- ③雪氷物理過程モデルの高度化と活用
 - ・積雪変質モデル SMAP と局地モデルにより日本全国の積雪の質量収支を定量的に把握する手法を開発し、成果を取りまとめて論文にて発表した。
 - ・本庁・気象技術開発室で取り組んでいる解析積雪深・降雪量及び降雪短時間予報プロダクトへの SMAP の利用について、技術的なサポートを行ってプロダクトの精度向上を図り、令和4年10月からの現業利用開始に貢献した。
 - ・大気-積雪/海氷放射伝達モデルをもとに、海洋モデル用海氷アルベド物理モデルの開発・改良を継続。

(副課題4) 積雲対流スキームのグレーゾーン対応と雲・放射スキームの精緻化

①積雲対流スキームの開発

- ・積雲対流スキームのフィードバック部分をグレーゾーンに対応させる、Malardel and Bechtold (2019)、松林(私信)に基づく手法を導入したGSMの評価と改良を進めた。サイクル実験の結果から、本手法の導入により熱帯平均で気温が低くなる傾向があること、台風の進路予測や強度予測は大きく変わらないものの二次循環が強くなる事例があることがわかった。また Galarneau and Davis (2013) の手法による台風移動速度の誤差の解析から、環境場の風の誤差による寄与が大きくなる一方、台風の半径の誤差による寄与が小さくなり、全体では平均的には差は小さくなっていったことがわかった。さらに TL1919 (水平格子間隔約10km) の単発予測実験を行い、線状降水帯事例で従来手法と比較した。成果を気象学会春季・秋季大会や数値予報課全球モデルチームの物理過程開発者ミーティング、Redmine Global のチケット#3200 で報告した。

②層積雲スキームの開発

- ・Kawai (2017) の層積雲スキームと組み合わせて導入した小森(2009)に基づく浅い積雲対流スキームに Malardel and Bechtold (2019) の手法を導入し、単発予報実験や低解像度一年積分実験で正しく適用できていることを確認した。Redmine Global のチケット#3563 で報告した。

③全球モデルにおける雲微物理過程の改良

- ・モデルにおける、マイナーに見える取り扱い(パラメータの下限值、上限値、スキームやプロセスの閾値による on/off、2つのスキームを並行して動かすか1つのみを排他的に動かすか、鉛直解像度、物理過程の詳細な数値計算法)が、モデルの雲や雲微物理に及ぼす影響を詳細に調査し、包括的な論文としてまとめ、J. Adv. Model. Earth Syst. で出版した(Kawai et al. 2022)。雲関係のみならず、大気モデル開発者全体にとって有益な内容となっている。
- ・MRI-ESM2 の雲フィードバック(温暖化時の雲の変化)について詳しく調査を行い、その結果を WGNE Blue Book で出版した(Kawai et al. 2022)。
- ・雲は空間解像度が上がるほど減少するという空間解像度依存性について、その原因を詳しく調査し、空間解像度が上がっても放射収支がずれないようにするための対処を探った。この対処法は先端プログラムの20kmモデルでも利用される予定である。

④全球モデルにおけるエアロゾル雲相互作用の高度化

- ・MRI-ESM2 におけるエアロゾルの活性化の計算において使用される上昇流の下限值が、雲粒の数密度に大きく影響する例などを詳しく調査し、マイナーに見える取り扱いの論文 Kawai et al. (2022, JAMES) に記述した。

⑤放射スキームの改良

- ・全球大気モデルで放射計算を行う際に必要となる「各サブカラム毎の雲の有無と雲水量の値を格子平均の雲量と雲水量の値から決定する部分(Stochastic Cloud Generator, SCG)」のコーディングと動作確認を引き続き行い、雲量についてのオーバーラップパラメータを変えた場合の SCG の挙動についてまとめた。
- ・開発中の SCG を全球大気モデルの放射スキームに組み込み時間積分を行った。雲の重なり方の仮定を変えた場合について、おおむね想定どおりのインパクトを得た。
- ・格子内の雲水量のゆらぎを表現するために格子平均の雲水量にかけるサブカラム毎の factor を乱数から計算する処理を SCG に実装した。また雲水量の確率分布として期待値1.0のガンマ分布と対数正規分布を実装した。この処理について基礎的な動作確認を行ったところ、想定どおりの結果を得た。

- ・これらの開発成果はRedmine Global の#1348, #3371 で共有した。
- ・令和3年度までに全球モデルの放射スキームにおける氷雲有効サイズ診断式の見直しを行った。その成果は全球決定論予報（GSM）に取り込まれて令和4年度末に現業化予定である。

(副課題5) エーロゾル・雲・降水微物理の素過程解明と微物理モデルの開発

①モニタリング・IN 解明

- ・吸湿度および INAS を共通指標として、つくばでモニタリング観測された大気エーロゾルの雲核（CCN）能・氷晶核（INP）能を、これまでに得られた多様なエーロゾル種を対象とした CCN 計・IN 計・雲生成チェンバーによる実験結果と比較し、大気中で有効に CCN・INP として働くエーロゾル種について解析した（田尻ほか, 2022, エアロゾル研究）。
- ・都市域（横浜市）と遠隔地（石川県）におけるエーロゾル粒子物理化学組成の違いが及ぼす INP 濃度への影響を明らかにするために、過去に捕集した粒子試料の化学組成、INP 濃度の測定を行い、エアロゾル科学技術討論会および日本気象学会にて発表した。
- ・低粒子量での INP 濃度測定を可能とする技術の確立を行い、航空機観測、都市域鉛直サンプリングにて捕集した試料の分析を進め、同時に採取した電子顕微鏡試料の分析も進めた。

②内部混合粒子実験

- ・大気エーロゾル粒子の CCN 能・INP 能の定式化には、混合度合いの影響を精度良く定量的に理解する必要があり、つくばを想定した混合状態のエーロゾル粒子に関する雲生成チェンバー実験の解析を進めるとともに、海洋上の多湿な環境下を想定した外部混合にある雲核による競合的雲粒発生に関する雲生成実験についても実験設定の拡張に着手した。
- ・ボックスモデルによる初期雲粒分布の感度実験を行い、吸湿性粒子2種を用いて吸湿度、上昇速度、付加するシーディング量を変化させて雲粒数濃度、雲粒粒径分布拡がり进行比较吟味し、結果を日本気象学会にて発表した（論文執筆中, Kuo et al., 投稿先未定）。

③詳細微物理モデル

- ・NHM-Chem のエーロゾルの二次生成過程の改良、特に沈着量および消散係数の過小評価と硝酸エーロゾルの過大評価の原因特定を行った。沈着量および消散係数の過小評価については解決したが、硝酸エーロゾルの過大評価はまだ未解決。そのため、氷晶核形成過程を組み込んだ詳細微物理モデルを実装した NHM-Chem による、エーロゾル放射雲降水相互作用に関する評価研究の論文化が遅れている。現在は東京の都市型豪雨への CCN/INP によるエーロゾル降水相互作用研究について論文執筆中（Kajikawa et al., in prep., 投稿先未定）。
- ・吸湿性粒子2種の CCN 特性に関する室内実験およびシーディング効果をボックスモデルによる数値実験と比較検証し、初期雲粒分布の情報から実測が困難な条件での吸湿度をモデルから推定する手法の開発を進めるとともに、CCN 能に関するボックスモデルの改良を行った。

④雲スキーム開発

- ・asuca とオフライン結合した asuca-Chem モデルを開発した（Kajino et al., Atmos. Environ., 2022）。またそれを現業化した（2022 年 12 月から 5 km 格子で東アジア域を予測）。その論文では、大気微量成分について、二次生成が活発となり降水による除去が働きにくい熱波期間を含む暑夏について、その月平均地上濃度が冷夏や平年並みの夏に比べても必ずしも大きくならないことを示した。
- ・SCALE 雷モデルとオフライン結合した Offline SCALE-Chem モデルを開発し、雷由来の NO_x と反応性全窒素 NO_y の予測を行い、富士山頂の観測により妥当性を評価した（Atmos. Environ. 誌に投稿中; Sato, Kajino et al.）。

⑤エーロゾル物理化学特性解明

- ・米国南東沖および西アフリカ沖（北大西洋）で、エーロゾル・雲の直接サンプリングの航空機観測に参加した。高濃度氷晶雲や塔状積雲の微物理構造、境界層内のエーロゾル分布などを観測し、初期結果を日本気象学会にて発表した。低圧下での SMPS 装置サンプル流量、CCN 計の過飽和度に関する評価を行い、境界層内でのエーロゾル粒径分布、CCN 数濃度、エーロゾル高度分布等のデータ解析を行った。
- ・低粒子量での INP 濃度測定を可能とする技術の確立を行い、航空機観測、都市域鉛直サンプリングにて捕集した試料の分析を進め、同時に採取した電子顕微鏡試料の分析も進めた。
- ・海洋に含まれる有機物の雲形成への寄与を明らかにするために、海水サンプリングに参加した。含まれる有機物が及ぼす粒子物性への影響（Ono, Iwata et al., 2023, Atmos. Environ.）および雲生成チェンバー、IN 計、CCN 計による海洋有機物粒子の雲形成への寄与を調べた。
- ・北極における観測を行った。これまでの結果をまとめて、北極での混合雲中の CCN や INP になる

- エアロゾル種を特定し、その生成メカニズムを考察した (Adachi et al., 2022, Atmos. Chem. Phys.)。
- ・過去に行った航空機を用いたエアロゾル観測の成果をもとに、高高度でのエアロゾル動態解明や隕石成分の寄与を明らかにし、論文発表とともにプレスリリースを行った (Adachi et al., 2022, Communications Earth & Environment)。
 - ・北海道沖で、海洋と雲の関係を明らかにする航空機及び船舶観測に参加して、エアロゾル試料の採取を行い、その電子顕微鏡分析を行った。
 - ・日本での代表的な INP として考えられる森林起源のバイオエアロゾルについて、放射性セシウムをトレースとして動態解析を実施した (Kajino et al., 2022, Atmos. Chem. Phys.; Watanabe, Kajino et al., 2022)。
 - ・都市の INP として考えられる自動車非排気粒子 (タイヤ摩耗片・ブレーキ粉塵) の発生インベントリを構築し、大気観測により妥当性を評価した (GeoHealth 誌に投稿準備中; Kayaba and Kajino, in prep.)。
 - ・NHM-Chem による視程予測や、過去のエアロゾル濃度の視程による再現、都市化 (ヒートアイランド、相対湿度低下) による視程への影響に関する研究を実施し、筑波大学の修士論文としてまとめた (石川[連携大学院学生])。
 - ・日本における霧の気候学的特徴について調査し、日本気象学会で発表した。

(2) 当初計画からの変更点 (研究手法の変更点等)

(副課題 2) 接地境界層における乱流輸送スキームの精緻化

- ②風洞実験においては大型風洞装置の改修工事に対応して、小型風洞装置を用いて予備実験等を行うこととした。

(3) 成果の他の研究への波及状況

(副課題 1) 高解像度非静力学モデルによる激しい気象現象の再現性向上

- ・NHM、asuca について、研究用途での入力データへの対応機能の整備や、現業数値予報システムの更新への気象研究所実験環境の対応などを行い、気象研究所でのこれらの数値モデルを用いた研究基盤の維持管理及び課題解決型研究の推進に貢献した。

(副課題 2) 接地境界層における乱流輸送スキームの精緻化

- ①数値計算から得られた強安定時における接地層の普遍関数 (Nakanishi et al. 2022) を用いた地表面フラックス評価スキームを気象モデル asuca に実装のうえ課題 P1 に提供した。

(副課題 3) 雪氷圏の監視・変動要因解明とその基盤技術の開発

- ・本副課題において開発・改良を行っている積雪変質モデル SMAP が、当庁がホームページ上から公表している解析積雪深・降雪量及び降雪短時間予報プロダクトの作成への現業利用が令和 4 年 10 月から開始された。
- ・本副課題において開発・改良を行っている海氷アルベドモデルについて、M2 課題担当者と協力しつつ仕様を決定し、海氷の塩分濃度や温度等、複数の入力パラメータを変化させた時の、可視域と近赤外域の 2 波長帯における海氷アルベドの計算を行い、海洋モデルの物理プロセス改良のため、計算結果を M2 課題担当者に提供した。

(副課題 4) 積雲対流スキームのグレーゾーン対応と雲・放射スキームの精緻化

- ・ソースコード等を数値予報課に提供した、全球モデルの放射スキームにおける氷雲有効サイズ診断式の見直しについては、全球決定論予報 (GSM) に取り込まれて令和 4 年度末に現業化予定である。

(副課題 5) エアロゾル・雲・降水微物理の素過程解明と微物理モデルの開発

- ・副課題 M5 と連携して asuca とオフライン結合した asuca-Chem モデルを開発し、それを現業化した (2022 年 12 月から 5 km 格子で東アジア域を予測)。

(4) 事前・中間評価の結果の研究への反映状況

事前評価において、「衛星データを活用した領域スケールの現象解明が重要」というご指摘をいただいた。当課題において衛星データの活用は不可欠であり、副課題 3 においては、様々な衛星のデータを活用した雪氷圏の物理量推定技術の研究を行うが大きな研究課題の一つとしており、副課題 1、4 において、領域数値モデルの精度検証等のために衛星データを利用している。

「積雪を精密に扱えるモデルの開発を期待する」というご意見を受け、気象研で開発されてきた積雪変質モデル SMAP の高度化に継続的に取り組んでいる。また、「領域モデルにおけるエアロゾルのパラメタリゼーション開発を」というご意見については、観測や実験を通じて得られたエアロゾルの特性を数値モデルの精度向上に活用する研究を着実に進めているところである。

なお事前評価において「大学等の研究を鼓舞するような対外的なリーダーシップが必要」というご指摘もいただいた。当課題において、国の内外で高く評価される研究成果が得られつつあるところであるが、内外の研究をけん引できる人材の育成に向けて今後も着実に歩みを進めてまいりたい。

中間評価においては、「課題としての共通の目標やそれに貢献するための優先順位をより明確に」「各副課題が連携・情報交換しつつ、予報モデル改善に向けた総合化を目指して効果的に研究を進めるのが重要」とのご指摘を受け、副課題間の連携や最終的な目標をより明確にするよう目標を修正した。

今後の研究の進め方

(副課題 1) 高解像度非静力学モデルによる激しい気象現象の再現性向上

- ① 水平分解能 2 km～125 km の NHM、asuca による梅雨期・夏季および冬季の再現実験により、異なる解像度間、モデル間の予測特性の比較、観測データによる統計検証を行い、モデルの改良点を検討する。得られたモデルの特性に関する知見の成果を取りまとめる。モデル計算の最適化や、汎用性を高めるツールの整備も継続する。
- ② 激しい気象現象のモデルによる再現性向上に向け、観測データとの比較、観測データによる現象機構解析、LES 実験を用いた分析を行う。雲物理過程の検証、改良、発雷と積乱雲構造の関係の分析、線状降水帯の理想化実験、対流雲の時間発展の分析、顕著現象、局地現象の再現実験などからモデルの問題点の抽出や改良に取り組む。モデルの再現性とその向上に関する知見の成果をとりまとめる。
- ③ 日本に接近・上陸する台風のうち、熱帯で発達した顕著な事例について、水平解像度 1 km 以下の asuca を用いた再現実験を実施し、台風中心付近の積乱雲群（壁雲）、同心多重壁雲構造、最大風速および急発達の再現性を、衛星観測等による検証、各物理スキームの感度実験により分析し、物理過程の改良に資する知見を調査する。得られた知見を成果としてとりまとめる。

(副課題 2) 接地境界層における乱流輸送スキームの精緻化

数値計算・風洞実験・野外観測を追加で行いつつデータ解析を進めて乱流輸送スキームを改善し、気象モデル asuca に実装する。

- ① 必要な検証計算（LES・DNS）を行って結果を取りまとめるとともに、気象モデル（asuca）への実装を進める。
- ② 気象研風洞において必要な追実験を行いつつ、データ解析の結果を取りまとめる。
- ③ 気象研露場において接地境界層の通年観測を行いつつ、データ解析の結果を取りまとめる。
風洞実験と露場観測は、乱流輸送スキームのパラメタリゼーションに必要な知見を得るものとする。とくに風洞実験では前年度の機能強化に基づいて従前は不可能であった実験条件について重点的に調べることにする。

(副課題 3) 雪氷圏の監視・変動要因解明とその基盤技術の開発

- ① 雪氷物理量を測定するための技術開発、連続観測
札幌・北見・長岡における放射・気象・積雪観測を継続し、変動の実態把握、分析のための解析を進める。そうした現地観測と同期させながら、必要な観測装置・分析装置を開発・導入・改良し、主に積雪・海氷を対象として、それぞれの物理過程の解明を進める。また、積雪深に対する地形の影響が大きな北海道・北空知地区の 2 地点に設置した積雪深計等による積雪深等の観測を継続し、積雪変質モデルの改良を進める。
- ② リモートセンシングによる雪氷物理量の監視、アルゴリズム開発・改良
①で得られた知見を活かしてリモートセンシングアルゴリズムを改良し、多バンドで時空間分解能の優れたひまわり、長期観測中の MODIS を搭載する Tera/Aqua や SGLI を搭載する GCOM-C（いずれも極軌道衛星）、マイクロ波衛星等の多様な衛星のデータを利用して、主に極域、日本周辺における雪氷物理量の空間変動を 20 年以上にわたる、量的ならびに質的な監視を行う。
- ③ 雪氷物理過程モデルの高度化と活用
①で得られた知見、①②で得られた検証データを活かして積雪不純物（光吸収性エアロゾル）を考慮

した雪氷放射過程、積雪変質過程等を含む、積雪変質モデル SMAP や海氷モデルの改良を行う。簡易版の開発も進める。これらを各種大気モデル・気候モデルに組み込み、変動メカニズム解明を行うとともに、予測精度を評価し、向上させる。この開発では、副課題 1 を含む大気モデル開発に関係する研究課題、エアロゾルに関係する研究課題と連携しながら進める。

(副課題 4) 積雲対流スキームのグレイゾーン対応と雲・放射スキームの精緻化

①積雲対流スキームの開発

フィードバック部分をグレイゾーンに対応させた積雲対流スキームを導入したモデルでの単発実験と事例調査、サイクル実験による性能評価と改良を引き続き行う。また結果について取りまとめる。引き続き観測や湿潤 LES による参照値の収集・作成を進める。

②層積雲スキームの開発

CTE 層積雲スキームと新しく開発した浅い積雲対流スキームに、荒川-シューバートスキーム等の他の物理過程の改良を組み合わせ導入したモデルでの実験を引き続き行って性能を評価する。また結果について取りまとめる。

③全球モデルにおける雲微物理過程の改良

全球モデルの雲微物理過程の見直しを引き続き行い、結果について取りまとめる。衛星データ等の観測データによる検証を行い、CMIP6 や CFMIP などの枠組みで行われるモデル間比較に参加する。

④全球モデルにおけるエアロゾル雲相互作用の高度化

地球システムモデルのエアロゾル雲相互作用の部分の見直しを引き続き行い、結果について取りまとめる。各種観測データによる検証を行い、CFMIP などの枠組みで行われるモデル間比較に参加する。

⑤放射スキームの改良

3次元大気モデルによる性能評価と改良を行う。また結果について取りまとめる。引き続き観測データ・再解析データによる検証・参照利用を行う。

(副課題 5) エアロゾル・雲・降水微物理の素過程解明と微物理モデルの開発

①氷晶核、雲核、エアロゾルの地上モニタリングを継続実施する。また、バーチャルインパクターや電子顕微鏡、冷却ステージ付き光学顕微鏡等を用いて有効な IN を引き続き調査し、解析された成果をとりまとめる。

②雲生成チェンバー等を用いて、代表的な内部混合粒子について CCN 特性測定実験を引き続き行い、ボックスモデルによる再現実験と比較し成果をとりまとめる。

③過去に得られた室内実験や観測データを基に、詳細微物理モデルの検証・改良を継続し、3次元モデル用の微物理パラメタリゼーションの改良に利用する。これらの改良をとりまとめて、CCN 能、IN 能の定量的なモデル化を行う。

④予報するエアロゾル情報等から CCN・IN 活性を算出する 3次元モデルの雲スキームの開発・改良を継続し、得られた成果をとりまとめる。

⑤外部研究機関等と協力した野外観測・サンプリングを実施して、電子顕微鏡等を用いた分析によりエアロゾルの存在状態、物理化学特性を引き続き調査し、解析された成果をとりまとめる。特に、室内実験との相違点から来るボックスモデル改良および内部混合粒子状態の標準化(②に関連)、エアロゾルタイプ別の微物理パラメタリゼーション改良(③に関連)について、終了時評価で残される課題も整理して各対応策の検討を引き続き進め、次期中期研究計画での研究内容に活かす。

研究成果リスト

(1) 査読論文：17 件

1. Maki, T., K. Hosaka, K. Lee, Y. Kawabata, M. Kajino, M. Uto, K. Kita, and Y. Igarashi, 2023: Vertical distribution of airborne microorganisms over forest environments: A potential source of ice-nucleating bioaerosols. *Atmospheric Environment*, **302**, 119726.
2. Orr, A., Deb, P., Clem, K. R., Gilbert, E., Bromwich, D. H., Boberg, F., Colwell, S., Hansen, N., Lazzara, M. A., Mooney, P. A., Mottram, R., Niwano, M., Phillips, T., Pishniak, D., Reijmer, C. H., van de Berg, W. J., Webster, S., and Zou, X., 2023: Characteristics of surface “melt potential” over Antarctic ice shelves based on regional atmospheric model simulations of summer air temperature extremes from 1979/80 to 2018/19. *Journal of Climate*, **36**, 3357–3383.

3. Ono, K., Iwata, A., Fukuma, T., Iwamoto, Y., Hamasaki, K., Matsuki, A., 2023: Characterization of adhesivity of organic enriched sea spray aerosols by atomic force microscopy. *Atmospheric Environment*, **294**, 119468.
4. Kinase, T., K. Adachi, M. Hayashi, K. Hara, K. Nishiguchi, and M. Kajino, 2022: Characterization of aerosol particles containing trace elements (Ga, As, Rb, Mo, Cd, Cs, Tl, and others) and their atmospheric concentrations with a high temporal resolution. *Atmospheric Environment*, **290**, 119360.
5. Kajino, M., A. Kamada, N. Tanji, M. Kuramochi, M. Deushi, and T. Maki, 2022: Quantitative influences of interannual variations in meteorological factors on surface ozone concentration in the hot summer of 2018 in Japan. *Atmospheric Environment*, **16** 巻, 100191.
6. Doan, V.-Q., F. Chen, H. Kusaka, J. Wang, M. Kajino, and T. Takemi, 2022: Identifying a new normal in extreme precipitation at a city scale under warmer climate regimes: A case study of the Tokyo metropolitan area, Japan. *Journal of Geophysical Research*, **127** 巻21号, 036810.
7. Mouri, H., J. Ito, 2022: Momentum flux fluctuations in wall turbulence formulated as a function of wall-normal distance. *Physics of Fluids*. (submitted)
8. Adachi, K., Y. Tobo, M. Koike, G. Freitas, P. Zieger, and R. Krejci, 2022: Composition and mixing state of Arctic aerosol and cloud residual particles from long-term single-particle observations at Zeppelin Observatory, Svalbard. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **22**, 14421-14439.
9. Kawai, H., K. Yoshida, T. Koshiro, and S. Yukimoto, 2022: Importance of Minor-Looking Treatments in Global Climate Models. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **14**, e2022MS003128.
10. Niwano, M., Suyu, M., Nagaya, K., Yamaguchi, S., Matoba, S., Harada, I., and Ohkawara, N., 2022: Estimation of seasonal snow mass balance all over Japan using a high-resolution atmosphere-snow model chain. *SOLA*, **18**, 193-198.
11. Kaneyasu, N., S. Kutsuna, K. Iida, Y. Sanada, and T. Tajiri, 2022: Cloudwater Deposition Process of Radionuclides Based on Water Droplets Retrieved from Pollen Sensor Data. *Environmental Science & Technology*, **56**, 17, 12036-12044.
12. Yamagami, A., M. Kajino, and T. Maki, 2022: Statistical evaluation of the temperature forecast error in the lower-level troposphere on short-range timescales induced by aerosol variability. *Journal of Geophysical Research*, **127** 巻13号, 036595.
13. Koshiro, T., H. Kawai, and A. T. Noda, 2022: Estimated cloud-top entrainment index explains positive low-cloud-cover feedback. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United State of America*, **119**, e2200635119.
14. Mizuno, Y., T. Yagi, and K. Mori, 2022: Momentum flux in turbulent boundary layers with weakly unstable stratification. *Journal of the Physical Society of Japan*, **91**, 054402.
15. 田尻拓也, 折笠成宏, 村上正隆, 2022: 大気中で実効的に氷晶核として働くエアロゾル粒子とシーディング物質. エアロゾル研究, **37** (3), 178-188.
16. 向井苑生, 佐野 到, 中田真木子, Brent Holben, AERONET group, 今須良一, 岡本 渉, 梶野瑞王, 小林 拓, 齊藤保典, 佐藤陽祐, 清水 厚, 高見昭憲, 中口 譲, 西 典宏, 朴 虎東, 藤戸俊行, 松見 豊, 溝渕昭二, 宮原裕一, 森山達天喜, 2022: エアロゾル集中観測 DRAGON/J-ALPS を終えて. エアロゾル研究, **37** 巻2号, 136-144.
17. Adachi, K., N. Oshima, N. Takegawa, N. Moteki, M. Koike, 2022: Meteoritic materials within sulfate aerosol particles in the troposphere are detected with transmission electron microscopy. *Communications Earth & Environment*, **3**, 134.

(2) 査読論文以外の著作物（翻訳、著書、解説等）：14 件

1. Mizuno, Y., T. Yagi, and K. Mori, 2023: Vortices behind a submerged cylinder in a rotating system. *Journal of Visualization*. (submitted)

2. Wada, R., S. Yonemura, A. Tani, and M. Kajino, 2023: Review: Exchanges of O₃, NO, and NO₂ between forest ecosystems and the atmosphere. *Journal of Agricultural Meteorology*, **79** 巻1号, 38-48.
3. Onuma, Y., Takeuchi, N., Uetake, J., Niwano, M., Tanaka, S., Nagatsuka, N., and Aoki, T., 2022: Modeling seasonal growth of phototrophs on bare ice on the Qaanaaq Ice Cap, northwestern Greenland. *Journal of Glaciology*.
4. Wang, K.-Y., P. Nedelec, H. Clark, N. Harris, M. Kajino, and Y. Igarashi, 2022: Impacts on air dose rates after the Fukushima accident over the North Pacific from 19 March 2011 to 2 September 2015. *PLOS ONE*, **17** 巻8号.
5. Mizuno, Y., T. Yagi, and K. Mori, 2022: Experimental study on a transition of flow in weakly unstably stratified turbulent boundary layers. *Proceedings of 12th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*, **12D**-176.
6. Tanikawa, T., 2022: Spectropolarimetry of snow and ice surfaces: measurements and radiative transfer calculations. *Springer Series in Light Scattering*, **8**, 87-124.
7. Niwano, M., 2022: Roles of Clouds in the Greenland Ice Sheet Surface Energy and Mass Balances. *Handbook of Air Quality and Climate Change*.
8. Yamaguchi, H., Y. Adachi, S. Hirahara, Y. Ichikawa, T. Iwahira, Y. Kuroki, C. Matsukawa, R. Nagasawa, K. Ochi, R. Sekiguchi, T. Takakura, M. Ujiie, and H. Yonehara, 2022: Upgrade of JMA's Global Ensemble Prediction System. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Earth System Modelling*, **52**, 609-610.
9. Kawai, H., T. Koshiro, and S. Yukimoto, 2022: Cloud feedbacks in MRI-ESM2. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Earth System Modelling*, **52**, 707-708.
10. Hashimoto, A., S. Nakai, M. Katsumata, S. Hayashi, 2022: Numerical simulation of the melting layer with a distorted bright band, observed on February 15, 2014, in Japan. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Earth System Modelling*, **52**, 5-05.
11. 梶川友貴, 梶野瑞王, 2023: 大気汚染物質が都市域豪雨の雲微物理過程と化学過程に及ぼす影響に関する数値実験とその検証 第1回都市極端気象シンポジウム (第18回台風研究会) 報告書, 56-67.
12. 平島寛行, 山口 悟, 庭野匡思, 山崎 剛, 加茂祐一, 荒川逸人, 安達 聖, 勝島隆史, 大澤 光, 橋本明弘, 石元裕史, 2023: 積雪ワークショップ開催報告. *雪氷*, **85**, 25-42.
13. 谷川朋範, 2022: 海氷のアルベドと分類. *リモートセンシング事典*.
14. 庭野匡思, 2022: グリーンランド氷床では今、何が起きているのか? -温暖化の最前線からの報告-. *太陽エネルギー*, **48**, 45-49.

(3) 学会等発表 : 76 件

ア. 口頭発表 : 55 件

・国際的な会議・学会等 : 8 件

1. Kawai, H., K. Yoshida, T. Koshiro, and S. Yukimoto, Importance of Minor-Looking Treatments in GCMs --- Can satellite observation reduce uncertainty in such treatments?, 第2回 EarthCARE モデリングワークショップ, 2023年3月, 修善寺
2. Yamagami, A., M. Kajino, T. Maki, and T. Toyoda, Synoptic-timescale variability of Arctic aerosol in three reanalyses and its relationship to the atmospheric circulation in summer., The 13th Symposium on Polar Science, 2022年11月, 東京都
3. Kawai, H., J. Chiba, and T. Koshiro, Simple parameterization of breakup processes of low clouds for GCMs, CFMIP Meeting on Clouds, Precipitation, Circulation, and Climate Sensitivity, 2022年7月, アメリカ, シアトル
4. S. Nyeki, J. Gröbner, L. Vuilleumier, C. Lanconelli, A. Driemel, W. Knap, M. Maturilli, N. Ohkawara, L. Riihimäki, and H. Schmithüsen, Extending the Calibration Traceability of Longwave Radiation Time-Series (ExTrac), International Radiation Symposium 2022, 2022年7月, ギリシャ, テッサロニキ

5. N. Ohkawara and T. Tanikawa, Spectral radiation measurements using the ground based spectral radiometer system for albedo and flux in Ny Ålesund, 17 th BSRN Scientific Review and Workshop, 2022 年 6 月, イタリア, イスプラ
6. Niwano, M., 2022 summer meteorological/glaciological field measurements in northwest Greenland, GEUS cool science, 2022 年 6 月, デンマーク, コペンハーゲン
7. Kawai, H., T. Koshiro, and S. Yukimoto, How can the double-ITCZ problem be alleviated in climate models?, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
8. Jouberton, A., Sato, Y., Hashimoto, A., Niwano, M., Shaw, T. E., Miles, E. S., Buri, P., Fugger, S., McCarthy, M., Fujita, K., and Pellicciotti, F., Combining high resolution atmospheric simulations and land-surface modelling to understand high elevation snow processes in an Himalayan catchment, EGU General Assembly 2022, 2022 年 5 月, Austria, Vienna

・国内の会議・学会等：47 件

1. 岩田 歩, Samuel Gray MURRAY HORWITZ, 栗原一嘉, 松木 篤, 奥田知明, 国内 2 地点における粒子化学特性と 氷晶形成粒子濃度の変動, 2022 年度エアロゾル・雲・降水に関する研究集会, 2023 年 3 月, オンライン
2. 田尻拓也, 折笠成宏, 郭 威鎮, 財前祐二, 村上正隆, 実大気中エアロゾル粒子の氷晶核能に関する比較評価, 2022 年度エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会, 2023 年 3 月, オンライン
3. 川合秀明, 吉田康平, 神代 剛, 行本誠史, モデルのマイナーに見える取り扱いは雲表現にとってどんなに重要か?, エアロゾル・雲・降水に関する研究集会, 2023 年 3 月, オンライン
4. 鎌田萌花, 佐藤陽祐, 橋本明弘, 数値モデルを用いた冬季北海道における降雪結晶の将来変化に関する解析, 2022 年度エアロゾル・雲・降水に関する研究集会, 2023 年 3 月, オンライン
5. 折笠成宏, 村上正隆, 岩田 歩, 松木 篤, 戸田雅之, 米国 HIWC サイエンスチーム, 高濃度氷晶雲プロジェクトでのエアロゾル・雲の航空機観測：初期結果, 2022 年度エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会, 2023 年 3 月, オンライン
6. 岩本洋子, 関口俊男, 濱崎恒二, 岩田 歩, 大林由美子, 「波の花」に含まれる界面活性物質の化学的性質と起源に関する研究, 金沢大学環日本海域環境研究センター2022 年度共同研究成果報告会, 2023 年 3 月, 石川県金沢市
7. 橋本明弘, 鈴木賢士, 梅原章仁, Rainscope ゾンデ観測と数値モデルによる降水形成機構解明, 第 18 回ヤマセ研究会, 2023 年 3 月, 宮城県仙台市
8. 橋本明弘, 黒崎 豊, 的場澄人, グリーンランドにおける局地風系と降雪過程に関する数値実験, 南極領域スケール雪氷研究集会, 2023 年 2 月, 立川
9. 折笠成宏, 気象研低温実験施設を活用した雲粒・氷晶発生機構に関する研究, 令和 4 年度気象庁施設等機関研究報告会, 2023 年 2 月, 東京都港区
10. 谷川朋範, 積雪-裸氷放射伝達モデルの開発, ISEE 研究集会プログラム「アジア高山域における氷河融解を加速する光吸収性不純物に関する研究集会」, 2023 年 1 月, 名古屋
11. 橋本明弘, 北西グリーンランドでの降雪数値実験, 氷河氷床変動に関する現地観測ーリモートセンシングー数理モデリング研究の新展開, 2023 年 1 月, 札幌
12. 渡邊俊一, 伊藤純至, LES を用いた対流雲内のサブグリッド輸送の検討, 非静力学モデルに関するワークショップ, 2022 年 12 月, つくば市
13. 伊藤純至, 毛利英明, 瞬時的な地表面フラックス診断を導入した LES, 第 24 回 非静力学モデルに関するワークショップ, 2022 年 12 月, 茨城県つくば市
14. 林 修吾, 研究者から見た気象研究所における研究活動について, 令和 4 年度 大阪管区気象台近畿地区気象研究会, 2022 年 12 月, 大阪
15. 林 修吾, 数 km から数百 m 解像度の数値モデルの降水・降雪再現性, 令和 4 年度 日本気象学会関西支部第 2 回例会, 2022 年 12 月, 大阪
16. 折笠成宏, エアロゾル・雲・降水に関する最新の研究と課題, 令和 4 年度東北地方調査研究会, 2022 年 12 月, 宮城県仙台市

17. 村上正隆, 折笠成宏, 岩田 歩, 松木 篤, 戸田雅之, 米国HIWCサイエンスチーム, エアロゾル・雲の航空機観測(高濃度氷晶雲プロジェクト)ー概要ー, 2022年度「航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進」研究集会, 2022年12月, オンライン
18. 大野耕平, 岩田 歩, 福岡剛士, 岩本洋子, 濱崎恒二, 松木 篤, 原子間力顕微鏡による海洋起源有機エアロゾルの付着性評価, 第27回大気化学討論会, 2022年11月, 茨城県つくば市
19. 橋本明弘, 素過程追跡モデルによる降雪粒子再現実験, SE-Dome アイスコア研究会, 2022年11月, 函館市
20. 大野知紀, 野田暁, 温暖化に伴う成層変化が乱流混合を通じて上層雲の変化に及ぼす影響, 気象学会 2022年度秋季大会, 2022年10月, 北海道札幌市
21. 林 修吾, 渡邊俊一, 橋本明弘, 藤田 匡, NHMとasucaによるモデル間相互比較実験(その3), 日本気象学会 2022年度秋季大会, 2022年10月, 札幌市
22. 村上正隆, 折笠成宏, 長谷川晃一, 紀平旭範, 榊原篤志, 竹村俊彦, 吉住蓉子, 篠田太郎, 加藤雅也, エアロゾル・雲・降水統一(CReSS-4ICE-AEROSOL)モデルを用いたUAE日周対流雲の再現実験(その2), 日本気象学会 2022年度秋季大会, 2022年10月, 札幌市
23. 田尻拓也, 折笠成宏, 財前祐二, 郭 威鎮, 村上正隆, 実大気中で氷晶核として働くエアロゾル粒子の比較評価, 日本気象学会 2022年度秋季大会, 2022年10月, 札幌市
24. 川合秀明, 吉田康平, 神代 剛, 行本誠史, 全球気候モデルにおけるマイナーに見える取り扱いの重要性, 日本気象学会 2022年度秋季大会, 2022年10月, 札幌市
25. 橋本明弘, 石坂雅昭, 本吉弘岐, 山下克也, 中井専入, 山口 悟, 冬季日本海における降雪形成機構に関する数値実験, 日本気象学会 2022年度秋季大会, 2022年10月, 札幌市
26. 堀 雅裕, 杉浦幸之助, 青木輝夫, 谷川朋範, 庭野匡思, 八久保晶弘, 的場澄人, 島田利元, GCOM-C/SGLIを用いた雪氷域環境監視と地上検証, 雪氷研究大会(2022・札幌), 2022年10月, 札幌市
27. 中山雅茂, 直木和弘, 谷川朋範, 長 幸平, 成長速度の異なる薄氷のマイクロ波輝度温度の測定, 雪氷研究大会(2022・札幌), 2022年10月, 札幌市
28. 谷川朋範, 増田一彦, 石元裕史, 大河原望, 中山雅茂, 海氷の放射計算に必要な海氷面ラフネスの推定, 雪氷研究大会(2022・札幌), 2022年10月, 札幌市
29. 鎌田萌花, 佐藤陽祐, 橋本明弘, 数値モデルを用いた冬季北海道における降雪結晶に関する解析, 雪氷研究大会(2022・札幌), 2022年10月, 札幌市
30. 石坂雅昭, 本吉弘岐, 山下克也, 中井専入, 山口 悟, 橋本明弘, 北陸平野部に大雪をもたらす条件と降雪粒子の特徴, 雪氷研究大会(2022・札幌), 2022年10月, 札幌市
31. 青木輝夫, 八久保晶弘, 庭野匡思, 的場澄人, 谷川朋範, 西村基志, 石元裕史, 島田利元, 井上 峻, Gallet Jean Charles, 堀 雅裕, 山口 悟, 可搬型積分球積雪粒径測定装置の開発, 雪氷研究大会, 2022年10月, 札幌
32. 庭野匡思, 酢谷真巳, 長屋幸一, 山口 悟, 的場澄人, 原田育郎, 大河原望, 気象庁 LFM-SMAP モデルシステムを用いた日本全域における積雪水当量時空間変動推定, 雪氷研究大会, 2022年10月, 札幌
33. 大沼友貴彦, 藤田耕史, 竹内 望, 庭野匡思, 青木輝夫, グリーンランド北西部氷河上で発生するクリオコナイトホール崩壊現象の数値モデル開発, 雪氷研究大会, 2022年10月, 札幌
34. 西村基志, 青木輝夫, 庭野匡思, 的場澄人, 谷川朋範, 山口 悟, 山崎哲秀, グリーンランド北西部 SIGMA-B サイトにおける表面熱収支と表面融解量の経年変動, 雪氷研究大会, 2022年10月, 札幌
35. 水野吉規, 八木俊政, 森 一安, 回転系において水没円柱の後流に発生する渦, 日本流体力学会 年会 2022, 2022年9月, 京都
36. 橋本明弘, 的場澄人, 山崎哲秀, 青木輝夫, グリーンランド北西部で観測された強風に関する数値実験, 日本流体力学会 年会 2022, 2022年9月, 京都市
37. 大竹秀明, 大関 崇, 今井正堯, 庭野匡思, 小野耕介, 太陽光発電システム上の積雪の動態ー2022年2月20日の多雪事例ー, 電気学会 電力・エネルギー部門(B部門)大会, 2022年9月, 福井
38. 田尻拓也, 折笠成宏, 郭 威鎮, 財前祐二, 村上正隆, 大気エアロゾル粒子の氷晶核能(その2), 第39回エアロゾル科学・技術研究討論会, 2022年8月, 東京都

39. 鎌田萌花, 佐藤陽祐, 橋本明弘, 数値モデルを用いた冬季北海道における降雪結晶に関する解析, 2022 年度日本気象学会北海道支部第 1 回研究発表会, 2022 年 7 月, 北海道札幌市
40. 毛利英明, 伊藤純至, 境界層乱流における運動量フラックスの変動法則, 乱流の予測可能性と可制御性, 2022 年 7 月, 京都府京都市
41. 橋本明弘, 降雪-積雪系の統合的理解に向けた降雪種モデリングの現状と展望, 積雪ワークショップ 2022, 2022 年 6 月, オンライン
42. 庭野匡思, 積雪変質モデル SMAP と雪氷圏向け領域気候モデル NHM-SMAP の現状と将来展望, 積雪ワークショップ 2022, 2022 年 6 月, オンライン
43. 石坂雅昭, 本吉弘岐, 山下克也, 中井專人, 山口 悟, 橋本明弘, 北陸平野部における集中降雪の現象論, 雪氷学会北信越支部大会, 2022 年 6 月, 新潟県長岡市
44. 橋本明弘, 庭野匡思, 山口 悟, 山崎哲秀, 青木輝夫, 北西グリーンランド・シオラパルク周辺に生じる強風に関する数値実験, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
45. 中川雅之, 吉村裕正, 松林健吾, 気象庁全球モデルにおけるグレーズーンに対応した積雲対流スキームの開発 (1), 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
46. 林 修吾, 渡邊俊一, 橋本明弘, 藤田 匡, NHM と asuca によるモデル間相互比較実験 (冬季), 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
47. 村上正隆, 長谷川晃一, 紀平旭範, 榊原篤志, 竹村俊彦, 吉住蓉子, 篠田太郎, 加藤雅也, エアロゾル・雲・降水統一 (CReSS-4ICE-AEROSOL) モデルを用いた UAE 日周対流雲の再現実験, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン

イ. ポスター発表 : 21 件

・国際的な会議・学会等 : 6 件

1. Tanikawa, T., N. Ohkawara, and T. Aoki, Monitoring of snow physical parameters by spectral radiation measurements using ground-based optical instrument in Ny-Ålesund, Svalbard, Seventh International Symposium on Arctic Research (ISAR-7), 2023 年 3 月, 東京都立川市
2. Niwano, M., Box, J. E., Fettweis, X., and Wehrlé, A., Bare ice darkening impacts on northwestern Greenland ice sheet runoff, AGU Fall Meeting 2022, 2022 年 12 月, アメリカ, シカゴ
3. Kawai, H., K. Yoshida, T. Koshiro, and S. Yukimoto, Importance of Minor-Looking Treatments in Global Climate Models, 6th WGENE workshop on systematic errors in weather and climate models, 2022 年 11 月, イギリス, レディング
4. N. Ohkawara, Efforts to reduce errors in infrared radiation observations at the Earth's surface, Metrology for Climate Action, 2022 年 9 月, (オンライン)
5. Kawai, H., J. Chiba, and T. Koshiro, Simple parameterization of breakup processes of low clouds for GCMs, 16th Conference on Cloud Physics, 2022 年 8 月, アメリカ&オンライン, マディソン&オンライン
6. Kawai, H., K. Yoshida, T. Koshiro, and S. Yukimoto, Importance of "Minor Treatments" in Global Climate Models, The 3rd Pan-GASS meeting, 2022 年 7 月, アメリカ, モントレー

・国内の会議・学会等 : 15

1. Kuo, W-C., K. Yamashita, M. Murakami, T. Tajiri, A. Hashimoto, and N. Orikasa, Numerical Simulation on Feasibility of Rain Enhancement by Hygroscopic Seeding over Kochi Area, Shikoku, Japan in Early Summer, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
2. Kuo, W-C., K. Yamashita, M. Murakami, T. Tajiri, A. Hashimoto, and N. Orikasa, Numerical Simulation on Feasibility of Rain Enhancement by Hygroscopic Seeding over Kochi Area, Shikoku, Japan in Early Summer, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
3. 渡邊俊一, 川瀬宏明, 廣川康隆, 野坂真也, d4PDF5km ダウンスケーリングを用いた線状降水帯の将来変化, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市

4. 中川雅之, 吉村裕正, 松林健吾, 気象庁全球モデルにおけるグレーゾーンに対応した積雲対流スキームの開発(2), 日本気象学会秋季大会, 2022年10月, 北海道札幌市
5. 折笠成宏, 村上正隆, 岩田 歩, 松木 篤, 戸田雅之, 米国HIWCサイエンスチーム, 高濃度氷晶雲プロジェクトでのエアロゾル・雲の航空機観測(その1), 日本気象学会2022年度秋季大会, 2022年10月, 札幌市
6. 川端康弘, 日本の気象官署における霧の気候学的特徴, 日本気象学会2022年度秋季大会, 2022年10月, 札幌市
7. 岩田 歩, Samuel Gray MURRAY HORWITZ, 栗原一嘉, 松木 篤, 奥田知明, 国内2地点における粒子特性の違いが及ぼす氷晶形成粒子濃度への影響, 日本気象学会2022年秋季大会, 2022年10月, 札幌市
8. 橋本明弘, 森 健彦, 新堀敏基, 高木朗充, 気象予測モデルを併用した新しい二酸化硫黄放出率推定手法の開発: その4, 日本火山学会2022年度秋季大会, 2022年10月, 静岡県三島市
9. 橋本明弘, 藤波初木, 佐々木織江, 坂井亜規子, 藤田耕史, ヒマラヤ山岳域の局地気象日変化の再現実験, 雪氷研究大会(2022・札幌), 2022年10月, 札幌市
10. 橋本明弘, 傾斜した融解層に関する数値実験, 第8回メソ気象セミナー, 2022年9月, 三重県津市
11. 岩田 歩, Samuel Gray MURRAY HORWITZ, 栗原一嘉, 松木 篤, 奥田知明, 横浜と能登における粒子特性の違いが及ぼす氷晶核濃度への影響, 第39回エアロゾル科学・技術研究討論会, 2022年8月, 東京都
12. 田尻拓也, 折笠成宏, 財前祐二, 郭 威鎮, 村上正隆, つくばで計測された大気エアロゾル粒子の氷晶核能(その4), 日本気象学会2022年度春季大会, 2022年5月, オンライン
13. 山上晃央, 梶野瑞王, 眞木貴史, 北極でのエアロゾルの変動と循環場の関係, 日本気象学会2022年度春季大会, 2022年5月, 東京
14. 川端康弘, 日本の主要空港における視程の変化, 日本気象学会2022年度春季大会, 2022年5月, オンライン
15. 橋本明弘, 庭野匡思, 山口 悟, 山崎哲秀, 青木輝夫, 2018年4月グリーンランド北西部シオラパルクで観測された強風に関する数値実験, 日本気象学会2022年度春季大会, 2022年5月, オンライン

(4) 投稿予定論文:

なし。

報道・記事

足立光司 プレスリリース「対流圏で採取したエアロゾル粒子から隕石由来の物質を電子顕微鏡分析で検出し、それらが成層圏から流れてきていることを示しました」

その他(4.(3)「成果の他の研究への波及状況」関連)

なし。

D データ同化技術と観測データの高度利用に関する研究

研究年次：4年目／5年計画（令和元年度～令和5年度）

研究代表者：瀬古 弘（気象観測研究部長）

課題構成及び研究担当者

（副課題1）衛星データ同化技術及び全球同化システムの改良

副課題代表者：岡本幸三（気象観測研究部）

〔気象観測研究部〕石橋俊之、石田春磨、岡部いづみ

〔台風・災害気象研究部〕林 昌宏

〔気象予報研究部〕中川雅之

（副課題2）メソスケール高解像度同化システム及びアンサンブル摂動作成法の改良

副課題代表者：川畑拓矢（気象観測研究部）

〔気象観測研究部〕澤田 謙、堀田大介、幾田泰醇、太田芳文、大泉 伝、佐谷 茜（5月から）、
田上雅浩（5月から）、安井良輔（5月から）、寺崎康児（6月から）、
瀬戸里枝（9月から）

〔台風・災害気象研究部〕荒木健太郎、小野耕介

〔気象予報研究部〕藤田 匡

（副課題3）衛星・地上放射観測および放射計算・解析技術の開発

副課題代表者：石元裕史（気象観測研究部）

〔気象観測研究部〕山崎明宏、工藤 玲

〔台風・災害気象研究部〕林 昌宏、荒木健太郎

〔気象予報研究部〕大河原望、谷川朋範、長澤亮二

（副課題4）地上リモートセンシング技術及びそれらをコアとした水蒸気等の観測技術に関する研究

副課題代表者：酒井 哲（気象観測研究部）

〔気象観測研究部〕吉田 智、西橋政秀（5月から）、及川栄治（6月から）、小司禎教（6月まで）

研究協力者：【氏名（機関）】

近藤圭一・横田 祥・川田英幸・原田正輝・雁津克彦（情報基盤部数値予報課）、
永井智広・吉本浩一（大気海洋部業務課気象技術開発室）、
河野宜幸・竹田智博・松元 誠・鈴木健司・中山和正（大気海洋部観測整備計画課）、
小嶋 惇、小司禎教／7月から（大気海洋部環境・海洋気象課）、
大塚道子（気象大学校）、澤田洋平、Le Duc（東京大学）、伊藤耕介（琉球大学）、
小林健一郎（神戸大学）、内山明博（環境研）、
斉藤和雄・呉 品穎（気象業務支援センター）、
真野裕三・増田一彦・露木 義（客員）

研究の動機・背景

（社会的背景・意義）

令和2年7月豪雨、令和3年7月1～3日、8月11～19日の前線による大雨、令和4年8月1～6日の大雨、令和4年台風14号や15号など、台風や線状降水帯、豪雨等による気象災害が毎年のように発生している。また、地球温暖化に伴って豪雨の降水量が増大し、より頻発するという指摘もされている。これらの自然災害の激甚化、少子高齢化等の社会環境の変化を踏まえ、今後10年程度の中長期を展望して「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方～災害が激甚化する国土、変革する社会において国民とともに前進する気象業務～」(H30.8.20)が交通政策審議会気象分科会により提言としてとりまとめられた。この提言において、重点的な取り組み事項として「豪雨等の予測精度向上」と「長いリードタイムの確保のための観測・予測技術の高度化」の必要性が指摘されている。

甚大な災害をもたらす線状降水帯やそれに伴う豪雨、台風等の顕著現象は、モンスーンから雲物理までの様々なスケールの現象が相互に作用しあうため、また、短期間に局地的に発生する

現象もあって、正確な予測が困難である。これらの現象について、近年の高密度・高頻度・高精度な観測データと発達が著しい電子計算機を駆使した「より長いリードタイムを確保して精度良く予測ができるデータ同化システム」の構築が望まれている。(副課題1, 2) また、令和2年7月豪雨のように激しい災害をもたらす顕著現象による被害を軽減するためには、それらの発生・維持のメカニズムを解明し、予測精度を向上させる必要がある。そのために水蒸気の時空間分布を、より高精度・高分解能で把握することが必要である。(副課題4)

静止気象衛星や各種地球観測衛星についても、既存の観測データの高機能・高時空間分解能化と共に、ハイパースペクトル赤外サウンダやドップラー風ライダー等の新しい観測センサの搭載が検討されている。これらの衛星の進歩に対応した利用法を開発すること、つまり、社会に有用な大気・地表面情報やデータ同化等を通じた数値モデル精度向上に資する情報を衛星プロダクトとして提供する必要がある。(副課題1, 3) それらの実現のためには雲・エアロゾル・火山灰・降雪・積雪等を対象とした大気地表面系の精密かつ高度な放射計算技術と、それを用いた衛星データ解析手法の開発が不可欠である。(副課題3) また、エアロゾルの組成別の情報や雲の特性、これらによる放射収支メカニズム等をより正確に把握することは、自然災害の激甚化・頻発化の可能性が指摘されている地球温暖化の監視・予測における大きな不確定要素であるエアロゾル及び雲の放射強制力の科学的理解を深めるために必要である。(副課題3)

(学術的背景・意義)

全球スケール大気現象は、雲物理からモンスーンまでの様々な時空間スケールの現象の相互作用によって生じており、その解析や予測には降水過程から全球スケールの力学までを適切に扱う数値予報データ同化システムの開発が不可欠である。降水過程から全球スケールの力学までを精度よく解析することは、気象学、統計的推定、計算科学等にまたがる学際的総合科学の重要テーマの一つである。この実現に向けて、アンサンブルを用いた高度な全球同化手法の開発や、これを駆動するための観測データ、特に衛星観測の有効な活用が重要である。(副課題1)

豪雨を構成する積雲対流は非線形・非ガウスな現象であり、線形・ガウスを仮定する4次元変分法やアンサンブルカルマンフィルタには限界がある。非線形・非ガウスな特徴を持つシビアな現象に適用できる新たな同化手法の開発が必要である。また、多くの高密度・高頻度なデータが入手できる「観測ビッグデータ」の時代を迎え、データ間の誤差相関やアンサンブルサイズの小ささなどから従来のやり方が適用困難になっている。高密度・高頻度な観測データをより有効に利用するための手法開発が必要である。(副課題2)

可視から赤外、マイクロ波にいたる波長での衛星観測に応じた大気地表面からの放射伝達計算や、そこに含まれる雲・エアロゾル等の大気粒子による光散乱特性や大気吸収特性のモデル化は、衛星による気象リモートセンシングの基盤的技術であり、世界の気象関係機関・研究所が開発の必要性や重要性を認識している課題である。またその技術はひまわりプロダクト開発に限らず、高精度衛星シミュレータとしての応用や観測チャンネルの校正、ひまわり後継機の仕様検討での利用など、幅広い学術的利用が期待される。(副課題3)

エアロゾルの放射強制力の正確な把握は、気候変動の監視・予測等に重要であるが、多様な物質が複雑に混合するエアロゾルは、短寿命で排出源が偏っており組成毎の分布把握が難しく、放射強制力には不確実性が大きい。エアロゾルの放射強制力の不確実性を低減し、気候変動を正確に監視・予測するためには、エアロゾルの組成別の情報の正確な把握が必要とされている。(副課題3)

GNSS (全球測位衛星システム) による水蒸気の観測については、気象庁では2009年より地上設置GNSS観測点から鉛直積算水蒸気量(可降水量)を、2014年3月からGSMで天頂遅延量をデータ同化している。GLONASS (ロシア)、GALILEO (欧州)、準天頂衛星(日本)等の近年の複数GNSS化に伴い増加する視線方向遅延量の解析技術の高度化、移動体での水蒸気量観測・解析技術の高度化、反射波による干渉を利用した土壌水分や積雪深、潮汐解析の研究が進展している。さらに最新の電離層研究を活用し、低廉な一周波受信機を利用した水蒸気量解析の研究も進められている。水蒸気ライダーについては、ラマンライダーを用いた鉛直分布の観測をデータ同化した際の精度向上についての技術の開発が進み、また、現業利用に適すると考えられる差分吸収法ライダー(DIAL)についても測器の開発が盛んに行われている。(副課題4)

令和2年7月豪雨では多数の線状降水帯が発生し、球磨川の氾濫などの災害を引き起こした。線状降水帯による豪雨予測の精度向上のため、船舶に搭載したGNSSによる可降水量観測、水蒸気ライダーによる線状降水帯に供給される水蒸気の鉛直プロファイル観測など、水蒸気分布の正確な把握が望まれている。(副課題4)

(気象業務での意義)

全球数値予報システムは気象業務の最も重要な技術基盤の一つであり、その精度向上には全球スケールでのデータ同化技術の改良が不可欠となっている。全球数値予報システムの精度向上は、防災情報の精度向上に資するだけでなく、2週間より長い時間スケールを対象とする解析予測システムの技術基盤にもなっており、波及効果は非常に大きい。衛星データ同化手法の改良は、数値予報の改善に向けて不可欠であり、気象庁情報基盤部数値予報課から特に「全天候域での輝度温度同化」の技術開発を要望されている。また新規データの有効性の実証などへの期待も高い。さらに気象庁情報基盤部気象衛星課からは、「ひまわり後継衛星搭載センサのインパクト調査」を要望されている。(副課題1)

数値予報課に対し、次世代のデータ同化システムの方向性を示し、また同化手法の改良につながる知見を提供する。情報基盤部数値予報課、気象庁大気海洋部観測整備課に対しては、新規データの観測システムシミュレーション実験(OSSE)等を通じて、データ同化に有効な観測データを開拓し、予測を改善する観測データの条件等の知見を提供する。数値予報課、大気海洋部予報課と航空予報室に、現業利用が令和元年6月から開始されたメソアンサンブル予報システム改良についての知見を提供する。リードタイムの長い予報を提供できるよう高度なデータ同化手法の開発を行う。(副課題2)

気象衛星課からの要望事項である「ひまわり8/9号プロダクト開発」に対応し、高性能な放射伝達計算に基づいた新規アルゴリズムによる既存プロダクトの改良や新規衛星プロダクトの開発などを行い気象業務に貢献する。大気海洋部環境・海洋気象課からの要望事項であるエアロゾル観測業務における観測測器の校正への支援が可能となり、同業務の安定実施に貢献する。さらに同業務における新しいエアロゾル情報のためのデータ解析支援の要望に対し、エアロゾル組成毎の情報抽出技術を提供することにより、地球環境変動監視の強化に貢献する。(副課題3)

水蒸気の時・空間構造を高精度・高分解能でとらえることで、線状降水帯等の甚大な災害をもたらす大気現象の機構解明・予測が向上でき、被害の軽減に貢献できる。20km間隔という高い空間密度のGNSSから得られる情報を高度利用することで、面的基盤情報等、気象庁で開発が進められるプロダクトに貢献できる。(副課題4)

研究の目的**(全体)**

全球からメソスケールまでのデータ同化技術と、衛星・地上リモートセンシング及び直接観測データを利用した監視・予測技術の開発による「台風、集中豪雨等の監視・予測精度向上」を目的とする。

(副課題1) 衛星データ同化技術及び全球同化システムの改良

全球データ同化・衛星同化の改善による「全球数値予報システムを用いる気象庁の様々な大気・海洋・環境予測・解析精度の高度化」を目的とする。

(副課題2) メソスケール高解像度同化システム及びアンサンブル摂動作成法の改良

メソスケールの大気現象に向けたデータ同化やアンサンブル予報の改良や開発による「顕著現象の予測精度の向上、防災気象情報の高精度化」を目的とする。

(副課題3) 衛星・地上放射観測および放射計算・解析技術の開発

衛星による火山灰物質推定や火山灰雲の物理量推定という新しい「火山灰情報の提供」、広く一般の大気・地表面の放射伝達計算に適用できる「粒子形状・散乱モデル開発の提供」、エアロゾル監視技術の高度化による「気候及び地球環境変動における社会課題の1つである黒色炭素や硫酸塩等の人為起源気候汚染物質による地球環境変動の把握」を目的とする。

(副課題4) 地上リモートセンシング技術及びそれらをコアとした水蒸気等の観測技術に関する研究

水蒸気ライダーやGNSS水蒸気観測で得られる水蒸気情報の強化による「水蒸気観測技術の確立」や「線状降水帯など災害をもたらす予測の難しい気象現象の理解と予測改善」を目的とする。

研究の目標**(全体)**

目的を達成するため、以下を行う。

- ・シビア現象の予測精度の向上のためのデータ同化技術の改良やアンサンブル予報技術の開発の開発(副課題1, 2)

- ・静止気象衛星ひまわり 8、9 号等の衛星データを有効かつ効率的に同化する技術の改良と大気放射収支及びエアロゾル・雲の監視技術の改良（副課題 1，3）
- ・大気中の水蒸気などの観測技術の開発・改良とその有効性の評価（副課題 4）

（副課題 1）衛星データ同化技術及び全球同化システムの改良

- (a) 衛星データ同化の改良
全天候域での衛星輝度温度同化など、衛星同化手法の新しい開発や、新規衛星データの導入を行う。ひまわり後継衛星等の将来の衛星観測を評価し、観測システムシステムを検討するため、OSSE を実施する。
- (b) 全球データ同化システムの改良
アンサンブルを用いた全球データ同化手法の開発・改良や、観測情報の拡充、モデル誤差の影響の軽減によって、より多くの観測情報をより効果的に同化する。

（副課題 2）メソスケール高解像度同化システム及びアンサンブル摂動作成法の改良

- (a) シビア現象に適用する高解像度非線形同化システムの開発
非線形性・非ガウス性が卓越しているシビア現象を念頭に高解像度同化システムを開発する。
- (b) 領域モデルを対象にした高頻度・高密度な観測ビッグデータの同化法の開発
高頻度・高密度な観測データを同化する手法を開発し、さらに観測誤差相関への対処法を開発する。
- (c) 領域モデルを対象にしたアンサンブル予報の摂動作成法の検証
シビア現象を想定したアンサンブル予報の摂動作成法の改良と検証を行う。

（副課題 3）衛星・地上放射観測および放射計算・解析技術の開発

- (a) ひまわり等衛星データを利用した大気・地表面リトリーバル手法の開発
最適雲推定(OCA)アルゴリズムや機械学習を用いた高度な雲物理情報の抽出技術を開発する。またエアロゾル効果の改良などによる高精度の日射量推定を実現する。ひまわり観測を用いた晴天域不安定指数や地表面射出率の推定を行い、その有効性を評価する。
- (b) ひまわりを用いた火山灰物理量推定アルゴリズムの開発
赤外サウンダ観測を利用した火山灰物理情報の推定技術を用いて、NOAA/NESDIS（アメリカ海洋大気庁、国立気象衛星データ情報サービス）から導入したひまわり火山灰アルゴリズム（VOLCAT）を改良し、火山灰物理量の推定精度を向上させる。また最適雲解析（OCA）アルゴリズムを利用した、ひまわり 8/9 号による最適火山灰推定アルゴリズム（OVAA）の新規開発を実施する。
- (c) 大気・地表面放射モデルの改良
エアロゾル粒子モデルを開発・改良し、ひまわりや衛星複合センサ解析手法の開発を行う。また、ひまわり後継機やひまわり 8/9 号を含む複合的な衛星データ解析に対応した高精度な大気放射計算手法の開発を行う。
- (d) 大気放射収支の変動及びエアロゾル・雲の監視技術の高度化
日射・大気放射エネルギー及びスペクトル観測技術の開発、及び、エアロゾル・雲等の推定技術の開発を行い、大気放射場の変動とその要因の監視技術を確立する。また、大気放射場の変動やその要因について解析を行う。

（副課題 4）地上リモートセンシング技術及びそれらをコアとした水蒸気等の観測技術に関する研究

- (a) 水蒸気ライダー
GNSS、水蒸気ライダーを含む複数の観測機器を統合し、水蒸気の時・空間構造を高精度でとらえる手法を開発する。船舶 GNSS による海上での水蒸気観測手法の実用化に取り組む。水蒸気ライダーの観測・開発及び現業化に向けた最適な観測ネットワークの検討を行う。
- (b) 船舶 GNSS
水蒸気ライダーや GNSS の観測・データ解析技術の開発・改良を行い、既存の観測網に加え、地上デジタル波、レーダー電波の位相等新たなリモセン機器と統合処理し、水蒸気の時・空間構造を高精度でとらえる手法の開発を実施することで、豪雨をもたらす気象現象の機構解明・予測に資する。
- (c) 水蒸気の時・空間構造解析
地上リモセン技術等を用いた水蒸気等の鉛直構造解析を行い、局地的大雨や集中豪雨の発生予測等に資する。

研究成果

(1) 今年度得られた成果の概要

(全体)

3章の研究の目標(全体)の項目に従って主な成果を挙げたい(詳細は、下の副課題毎の成果リストを参照いただきたい)。

- 「シビア現象の予測精度の向上のためのデータ同化技術の改良やアンサンブル予報技術の開発」(副課題1, 2)
- ・地上設置型マイクロ波放射計による輝度温度データの高頻度同化、水蒸気ライダーによる水蒸気鉛直プロファイルの同化によって、それぞれ降水予測にインパクトがあり、さらに合成開口レーダーによる海上風プロダクトの同化によって、台風の表現が改善することを確認した。
- ・1000メンバーのアンサンブル予測について、格子間隔5kmのアンサンブル平均(決定論予測)からの予測は位置、降水強度ともに比較的良好に再現された。予報時間が18時間と長いメンバー間のばらつきが大きく、豪雨域で10~20%の確率で大雨が予測できた。
- ・全球データ同化システムの改良、観測誤差相関(水平、チャンネル間)の導入や高度化による観測情報の拡充、アンサンブルを用いた変分法同化システムの水物質の共分散構造などの高度化を行った。
- 「静止気象衛星ひまわり8、9号等の衛星データを有効かつ効率的に同化する技術の改良と大気放射収支及びエロゾル・雲の監視技術の改良」(副課題1, 3)
- ・衛星データ同化の改良、風ライダー搭載衛星Aeolusの視線風速、「ひまわり」の全天候域での輝度温度、マイクロ波センサの陸面での輝度温度などの同化について処理の高度化を行った。またハイパースペクトル赤外サウンダによる多チャンネル情報を有効に活用するための同化手法の改良を進めた。
- ・赤外サウンダデータを用いた火山灰物質情報の推定法を確立し、その結果を利用する「ひまわり/GCOM-C解析」を複数の火山噴火事例について実施した。複合の衛星を用い、火山灰物質情報の推定のアルゴリズムが有効であることを確認した。
- ・スカイラジオメータとライダーの地上観測データを複合解析することにより、境界層高度およびエロゾル組成(水溶性・光吸収性・ダスト・海塩)の鉛直分布を導出した。
- 「大気中の水蒸気などの観測技術の開発・改良とその有効性の評価」(副課題4)
- ・梅雨期九州での水蒸気ライダーによる下層水蒸気鉛直構造の連続観測に成功し、データ同化実験による豪雨の発生機構を解析した。
- ・船舶搭載GNSS装置による海上での水蒸気リアルタイム連続観測システムを構築し、気象庁と協力して気象庁観測船と海上保安庁測量船に実装し、海上での水蒸気リアルタイム連続観測を実現した。

今年度の各副課題の詳細な成果を以下に示す。

(副課題1) 衛星データ同化技術及び全球同化システムの改良

(a) 衛星データ同化の改良

- ・ひまわり後継衛星への搭載を検討しているハイパースペクトル赤外サウンダのインパクト調査のため実行したOSSEにおいて、予測誤差への観測の感度(FSOI)を用いて、改善効果の高いチャンネルや領域を調査した。
- ・ひまわり8号の全天候輝度温度(ASR)データの同化に向けて、雲の効果を考慮した品質管理等を改良し、晴天輝度温度データの同化を概ね上回る予測改善を得た。ASR同化に必要な、雲の効果を考慮した観測誤差共分散やバイアス補正処理の効果について、個別に調査し、結果について論文を投稿した。
- ・晴天輝度温度データ(CSR)について、下層気温に感度を持つバンド16を新たに同化するため、品質管理処理の開発を行い、検証を行った。バンド16のように大気透過率が高く地表面の影響を受けるCSRを同化するには、放射計算に用いる地表面パラメータ(地表面温度など)の精度が重要である。そこで窓バンドのCSRから従来利用していたモデル第一推定値の地表面温度よりも高精度な地表面温度をリトリブして用いた。その結果、バンド16のCSR同化により解析・予測精度が改善する結果を得た。予測精度の改善率について見られた日変化について調査し、モデル大気下層バイアスが関連しているとの知見を得た。これらの成果について論文を投稿した。
- ・マイクロ波輝度温度同化における陸域高度利用を行うため、マイクロ波気温サウンダに対して陸面射出率の動的推定手法(DE)を気象庁数値予報課のNAPEXに移植し、調査を行った。観測輝度温度と計算輝度温度の差が日中と夜間で大きく異なることが判明した。また最新の放射伝達コード(RTTOV13)への対応を行った。これら成果の一部は外国の会合やワークショップで発表した。

- ・衛星搭載ドップラー風ライダー（DWL）の同化や将来の実現に向けて、令和3年度までに行った同化処理の開発・改良、OSSEの成果を用い、DWL搭載衛星Aeolusの実データを同化した実験を行った。台風進路・強度予測への同化インパクトについて、台風位置とAeolusデータカバレッジの位置関係毎にグループ分けし、詳細な統計調査・事例解析を行った。これらの研究結果について、国内外のワークショップや学会等で発表した。
- ・ハイパースペクトル赤外サウンダがもつ観測情報を有効に活用するため、主成分スコアを利用した情報圧縮の衛星データ同化への応用に関する研究を進めている。令和4年度は、主成分分析における固有ベクトルに基づいたチャンネル選択手法を開発し、実際のスペクトルデータからチャンネル選択を実施するためのシステムを整備した。また、スペクトルの観測データ及びモデル出力からの放射伝達計算結果のどちらでも主成分分析が実行できるようにした。選択したチャンネルのデータによる同化処理を可能にするために既存の同化システムを改修した。選択したチャンネルを利用した同化サイクル実験から予報精度への影響を調査し、チャンネル選択方法が妥当であることを証明した。さらに、ディープラーニング手法のチャンネル選択への応用可能性について調査・検討した。
- ・衛星搭載雲レーダー（Earth CARE や Cloud Sat）を用いたモデル検証・同化に向けて、全球モデルがレーダー反射因子観測をどの程度再現しているかを調査した。

(b) 全球データ同化システムの改良

- ・アンサンブル生成と決定論的解析を一つの変分法同化システムで行う同化システムの研究を気象研全球NAPEX上で進めている。アンサンブル解像度を20kmに高解像度化したシステムを構築し、水物質の共分散構造を明らかにした。
- ・計算コストの低減のため、モデル積分時間間隔の増加、変分法の最適化、基本場更新、アンサンブル処理、物理過程計算密度の低減等を検討し、解析や予報精度に与える影響を調べた。
- ・変分法によるアンサンブル同化の理論基盤である背景誤差共分散の根の定式化や非正則性の問題についての論文が受理された。
- ・水物質の情報を持った観測の高度利用のために、マイクロ波輝度温度観測の誤差共分散行列構造の流れ依存性を扱えるように拡張したデータ同化システムについて、水物質の影響の大きさごとに観測インパクト評価し、これらのマイクロ波観測のインパクトが従来手法の2倍程度に増加すること、水物質の影響を最も強く受けた観測(全体の数%)についても明瞭なインパクトがあることがわかった。
- ・感度解析を応用した超高精度な解析場(真値代替場)の高解像度化(水平20km、鉛直100層)について、引き続きDWLのOSSEの真値代替場として利用した。
- ・変分法アンサンブルと、同化理論に基づいた標本統計による誤差共分散行列の完全な客観推定の構成とそれによる台風をはじめとする全球数値予報精度の向上についての査読論文を投稿した。
- ・変分法アンサンブルを用いて大気の大規模構造を解析し、査読論文を投稿した。
- ・モデル予測の系統的な誤差の要因の一つである海面水温等の下部境界条件の解析精度向上及び境界付近の観測の高度利用のために、これらの解析を大気解析と同時にを行うように大気解析を拡張した。低周波マイクロ波等の衛星データの増強も行った同化システムでサイクル実験を行い、熱帯を中心に予報精度が改善することを示した。

(副課題2) メソスケール高解像度同化システム及びアンサンブル摂動作成法の改良

(a) シンビア現象に適用する高解像度非線形同化システムの開発

- ・メソアンサンブル予報システムを利用した顕著現象の予測可能性向上を目指し、メソアンサンブル初期摂動に総観場の不確実性を反映できる手法の開発を行った。本手法により、夏季冬季ともに降水確率予測精度が改善するとともに、顕著現象に対する複数気象シナリオの決定論的予測精度も改善することが明らかとなった。
- ・前年度までの水蒸気誤差分布に対する拘束法を拡張して、ガウス型変分法システムの枠組み内で弱い非ガウス性を考慮する手法を考案し、その定式化に向けて調査を行った。同時に観測要素毎に観測値で層別化した誤差統計を行い、考慮すべき非ガウス性について検討を行った。
- ・Huber ノルムを適用したLETKFを開発し、線状降水帯事例に適用した。
- ・観測摂動法によるEnKFと通常のEnKFのハイブリッドシステムを開発し、非ガウス性が高いときに有効であることを確かめた。
- ・「富岳」およびNAPS上で、メソNAPEX(メソスケール大気データ同化実験システム)および局地NAPEX(局地スケール大気データ同化実験システム)を構築し、インパクト実験が行える環境を整えた。

(b) 領域モデルを対象にした高頻度・高密度な観測ビッグデータの同化法の開発

- ・流れに依存する背景誤差のスケール依存性を同化で考慮するためウェーブレット制御変数を導入した変分法の特長調査を行った。アンサンブル摂動の各スケール成分の重みが、卓越する気象現象に応じて、高度や要素により変動することを確認した。多数メンバーによる結果を参照してスケールごとの局所化を検討した。スケールごとの背景誤差特性が同化に適用され、インクリメントが観測データの間引き間隔に敏感に応答することが分かった。
- ・地上設置型マイクロ波放射計で観測した可降水量や 1D-Var で得られた温度や湿度の鉛直プロファイル、輝度温度について、気象研メソ NAPEX（メソスケール大気データ同化実験システム）を用いて同化実験を行った。可降水量や温度・湿度の鉛直プロファイルを同化すると予測精度が改善することを確認した。輝度温度を 2 分間隔の頻度で直接同化するとさらに予測精度が改善することを確認した。
- ・合成開口レーダー（SAR）の海上風プロダクト同化のインパクトを調査した。極端現象における観測データの有効活用のため、観測誤差分布関数として非ガウス分布である Huber 損失関数を導入した。また観測誤差の風速・入射角依存性を明らかにした。2019～2020 年の台風事例を対象に同化実験を行い、対流圏中層の風速の改善が得られることを示した。
- ・二重偏波レーダーのデータ同化を目的に、東京大学大気海洋研究所との共同研究の一環として、雲微物理スキームとレーダー観測シミュレーションを高度化した。観測を基にスキームの雨滴の粒径分布や雪の粒子形状の仮定を拡張することで予測精度向上が得られた。また gray zone スケールにおけるレーダー観測シミュレーションの結果から、台風境界層に対する境界層スキーム依存性を明らかにし、査読付き論文として出版した。
- ・豪雨の上流側の東シナ海上での洋上ドローン観測で得られた温度と湿度、水平風について、気象研メソ NAPEX を用いて同化実験を行った。それらのデータを用いることにより、降水予測の予測精度が改善する事例があることを確認した。
- ・次期衛星のハイパースペクトル赤外サウンダのメソ OSSE の結果を分析した。メソ OSSE の疑似観測データには 1 次元変分法（1D-Var）リトリーバルデータ（T1 課題の成果）を用いた。平成 30 年 7 月豪雨、令和 2 年 7 月豪雨の事例では、晴天域でのインパクトが同化サイクルや予測を通じて伝播し、梅雨前線上の低圧域に伴う降水予測が改善した。平成 29 年 7 月九州北部豪雨では、スケールの大きい環境場が改善した。一方、局地的強雨の予測は不十分であり、本 OSSE の解像度などによる限界とみられた。
- ・中国が運用している世界初の静止気象衛星搭載赤外サウンダ FY-4A/GIIRS のデータ品質や後継機の動向について国際会議等で最新の情報を収集・分析し、GIIRS 固有の時間変化バイアスの成因が分かった。その最新の状況について、解説を加えて庁内気象衛星利用検討チーム（赤外サウンダ OSE/OSSE 班）に報告・共有した。
- ・中国が運用を開始した現業静止気象衛星 FY-4B に搭載された赤外サウンダ GIIRS の L1 データを取得し、数値予報への活用を想定して、データ品質と特性の調査を行った。FY-4B は FY-4A よりもデータ品質が大幅に改善していることを確認した。
- ・ハイパースペクトル赤外サウンダの同化前データ品質管理におけるダスト（黄砂）の影響の調査に着手した。先行研究の文献調査を行ってダスト検出のために利用するチャンネルの候補を選定し、気象研メソ NAPEX のデータ品質管理にダスト検出スキームを組み込んで試験を行った。ダスト検出精度を高めるためには、さらに利用するチャンネルを精査・最適化することが分かった。
- ・気象研究所のメソ解析システム NHM-LETKF に都市キャノピースキーム SPUC を組み込み、環境省大気汚染物質広域監視システム「そらまめ君（AEROS）」からの高密度地上観測データを同化することで、初期値の地表付近の気温場や水蒸気場の推定精度が向上し、局所的な強い降水をもたらす水平風収束や対流の立ち上がり精度が向上することが確かめられた。研究成果をまとめて論文発表した。
- ・水蒸気ライダーで得られた水蒸気鉛直プロファイルデータを気象研メソ NAPEX に同化することにより、大気下層の水蒸気場の解析値・予報値が共に改善することを確認した。また、2021 年 7 月 10 日に鹿児島県北西部で発生した線状降水帯事例に関して、水蒸気ライダーデータの同化により、降水域の予測精度が改善することが分かった。
- ・マイクロ波放射計搭載小型衛星群による高頻度観測の同化を想定して、衛星群の軌道シミュレーションおよび観測システムシミュレーション実験を行い、領域モデルでの降水予測への効果や、衛星群構成と降水予測精度の関係を検討した。研究成果を論文に発表した。
- ・大気陸面結合同化に基づいた陸域の全天候マイクロ波データ同化手法を開発し、日本の大雨事例を対象とした領域モデルに適用し、降水予測精度の向上を確認した。

- ・赤外線大気サウンディング干渉計によって観測されることを想定した水蒸気量と水蒸気同位体比の疑似観測データを作成し、それによる理想化実験をNICAM-WISOを用いて行った。結果、従来観測に加えて、衛星観測された水蒸気量や同位体比を追加で同化することで、観測が空白な地域を中心に水蒸気量や同位体比だけでなく、気温や水平風の精度がさらに向上することがわかった。これらの成果について学会や研究集会にて発表した。
- ・衛星データ同化技術の高度化を目指した「成層圏から中間圏・下部熱圏の大気微量成分による放射冷却・加熱率推定」に向けて、地表から熱圏までを含む大気大循環モデルに化学輸送スキームを組み込み、2016年1月について現実大気再現実験を行なった。大気微量成分を一定としたシミュレーションに対して、大気微量成分による化学反応・輸送を含めたシミュレーションでは、上部中間圏から下部熱圏にかけての白夜（極夜）の領域でCO₂の光解離が促進（抑制）されることを示した。また、オゾンに関しても、中間圏界面付近の日変動も良く再現することができた。
- (c) 領域モデルを対象にしたアンサンブル予報の摂動作成法の改良
 - ・1000メンバーによる大アンサンブルLETKFによって、2019年東日本台風に対して風向および風速に関する確率予測を精度良く行えることを示した。また台風進路予測に対して側面境界摂動が極めて重要であることを確認した。
 - ・メソ解析システムNHM-LETKF（気象庁非静力学モデルを用いた局地アンサンブル変換カルマンフィルタ）を用い2018年8月の東京の雷雨事例を再現した。アンサンブルメンバー50個、解像度15kmと5kmで実験を行い、降水分布が精度よく再現できた。成果をパリ五輪研究デモンストレーション会合で発表した。
 - ・1000メンバーによる大アンサンブルLETKF（局地アンサンブル変換カルマンフィルタ）によって、2022年7月18日から19日にかけて九州北部や中国地方で発生した線状降水帯の予測可能性の調査を実施し、半日程度前から豪雨発生の可能性を示した。
 - ・防災気象情報の高精度化のために洪水キキクル（流域雨量指数）と1000メンバーのアンサンブル気象予測を用いて2020年7月の球磨川の事例で洪水の確率予測を行った。甚大な被害が出た地域で洪水が発生する確率が約60%であることを災害が発生する12時間に示すことができた。比較対象としてMEPSの100メンバーの気象予測を用いた実験も行ったが1000メンバーの予測精度が優れていることが示された。

（副課題3）衛星・地上放射観測および放射計算・解析技術の開発

- (a) ひまわり等衛星データを利用した大気・地表面リトリバル手法の開発
 - ・大気不安定指数について、ひまわり後継衛星に搭載を計画している赤外ハイパースペクトルサウンダを想定したシミュレーション研究を行っている。欧州の衛星に搭載予定の赤外サウンダ疑似観測を想定した気温・水蒸気プロファイル推定手法を開発し、日本域においてCAPE等の不安定指数を算出してその有効性を調査している。また、開発したアルゴリズムを極軌道衛星の赤外サウンダ観測（AIRS, IASI, CrIS）にも導入し、台風中心部等における大気プロファイル推定・台風強度推定について航空機ドロップゾンデ観測やベストトラックデータとの比較を行っている。
- (b) ひまわりを用いた火山灰物理量推定アルゴリズムの開発
 - ・赤外サウンダ用高速スペクトルシミュレータ（MBCRM）について、6ストリーム解析解を利用した放射計算コードの改良を行った。
 - ・赤外窓領域での輝度温度差が正になる見逃し火山灰事例について、用いる火山灰の光学特性モデルによっては観測に整合した輝度温度スペクトルがシミュレーション計算で得られることがわかった。
 - ・OVAAを改良し、ひまわり8号とGCOM-Cが観測した火山灰雲を独自アルゴリズムで解析できるようにした。過去の噴火事例の火山灰雲解析データについて、気象研究所火山研究部第2研究室へ提供し移流拡散モデルへの同化アルゴリズム開発について協力をおこなっている。結果について共著論文を投稿した。新たな噴火事例解析を継続し、火山灰物質情報の依存性についての調査およびNOAA/NESDISの火山灰アルゴリズム（VOLCAT）と比較調査を行っている。
 - ・MBCRMによる赤外サウンダ解析とひまわり/GCOM-CのOVAAを組み合わせた火山灰の複合衛星解析アルゴリズムについて、気象学会秋季大会で発表を行った。
- (c) 大気・地表面放射モデルの改良
 - ・A-Trainの衛星搭載イメージャとライダーによるエアロゾル組成プロダクトについて、論文を作成し、国際学術誌に投稿した。また、同内容について解説記事を作成し、国内学術誌に投稿した。
 - ・マイクロCT（断層撮影法）データを利用して開発した霰および雪片モデルを用いDDA法による計算でテーブル化したレーダー反射特性について、6月に開催された積雪ワークショップで報告を行った。
 - ・フェーズフィールド法を用いた積雪変質モデルの開発について6月の積雪ワークショップで進捗を報告した。

- ・不純物が内部混合した氷粒子の幾何光学散乱特性計算コードが完成し、吸収物質の混合状態による光散乱特性の違いについての研究を開始した。球粒子の場合に起こる不純物の配置による吸収特性の変化は非球形氷粒子の場合は効果的ではないことがわかった。
- ・海水の波長別偏光特性をシミュレートする大気-積雪・海水系放射伝達モデルを改良し、より複雑な海水・積雪状態でのシミュレーションを可能にした。
- (d) 大気放射収支の変動及びエアロゾル・雲の監視技術の高度化
 - ・現行のひまわり 8/9 号のシミュレーションデータと実際の観測データを使用し、エアロゾル組成、地表面アルベド、海上風速、クロロフィル a 濃度を推定する解析手法を開発し、各パラメータを推定可能か調査した。結果、光吸収性とダスト粒子の推定が難しいことが分かった。他のパラメータは十分とは言えないが、推定できることが分かった。
 - ・気象研の敷地内で 2 台の全天カメラによる雲のステレオ観測を実施した。そして、雲分布の判別、ステレオ立体視によって雲底高度を推定する手法について、プロトタイプを開発し、事例解析を行った。ライダーを使って雲底高度を検証し、整合性を確認した。今後は、羽田空港で実施する 2 台の全天カメラ観測に適用し、解析手法を調整する。
 - ・大気海洋部環境・海洋気象課と南極観測隊によるスカイラジオメータ観測の安定運用に向け、検定観測・解析に係る技術提供とハードウェア特性に関する知見の情報共有を継続して行った。検定観測については、マウナロア噴火の影響によりマウナロア観測所での検定観測の実施が不可能となったため、代替地の検討及び代替候補地の情報収集を行い、大気海洋部環境・海洋気象課との情報共有を行った。
 - ・スカイラジオメータの内部温度測定を改良を行った後、温度特性検査を実施した。特性検査結果は、良好な結果を得ており、以前より温度特性の表現が改善された。
 - ・RPG 社製地上設置型マイクロ波放射計について、気温・水蒸気プロファイルを推定する 1DVAR 計算コードを新規開発し、気象技術開発室に提供した。また同様な放射計算を用いてゾンデプロファイルを入力とした輝度温度の理論計算を行い、輝度温度の理論計算値を用いて、気象研での中間検査において、マイクロ放射計観測網で納入配備されるマイクロ波放射計の観測精度評価を実施した。

(副課題 4) 地上リモートセンシング技術及びそれらをコアとした水蒸気等の観測技術に関する研究

(a) 水蒸気ライダー

- ・水蒸気ラマンライダーによる観測（長崎市野母崎、鹿児島県下甕島、気象研露場）を行った。
- ・2022 年に緊急研究「集中観測等による線状降水帯機構解明研究」で実施した集中観測のゾンデ観測において支援を行った。
- ・九州での水蒸気ラマンライダーによる観測データをラジオゾンデ観測データと比較し、相互検証を行った。
- ・水蒸気ラマンライダーやゾンデ観測の観測データを副課題 2 に同化用データとして提供するとともに、線状降水帯データベースに提供した。
- ・今後の水蒸気データの現業利用に向けて、九州の水蒸気ライダーの観測データをリアルタイムで大気海洋部に提供した。
- ・人工知能を利用した観測データの品質管理、デノイズ手法、及び最適な鉛直・時間解像度を評価する手法を開発した。その結果をまとめた論文がレーザーセンシング学会誌に掲載された。
- ・長崎市野母崎における水蒸気ラマンライダー観測で得られた水蒸気プロファイルのデータ同化実験を行い、事例によっては降水予測の改善が得られることを確認した。その結果をまとめた論文が Monthly Weather Review に掲載された。
- ・機械学習を用いた水蒸気ライダーデータのノイズ除去を行い、結果を気象学会等で発表した。
- ・気象研究所露場においてバイサラ社製水蒸気 DIAL の検証観測を行った。
- ・水蒸気 DIAL の観測精度改善のための開発・調整を行った。
- ・気象研露場において、水蒸気ラマンライダーとドローン、ラジオゾンデ観測データを比較し、相互検証を行った。

(b) 船舶搭載 GNSS

- ・気象庁環境・海洋気象課と協力し、以下を実施した。
- ・民間船 10 隻への GNSS 水蒸気観測装置の実装を推進中。2023 年 1 月 12 日現在 10 隻中 9 隻へ設置した。
- ・大気遅延量勾配パラメータを用いた品質管理手法を構築し、気象庁船、海上保安庁測量船、民間船舶装置へ実装した。
- ・欧州の測位衛星 GALILEO を解析に導入することで、解析の安定化、精度の向上を確認した。2023 年 1 月より、順次船舶 GNSS 解析に導入する。

- ・電離層モデルが現実と乖離した際に、解析ができなくなる不具合を、二周波の観測位相から電離層の影響を推定することで解消できることを確認した。2023 年 1 月より順次船舶 GNSS 解析に導入する。
- ・科研費で行ってきた5隻の民間船、研究船による東シナ海 GNSS 観測を、2022 年 11 月に全船撤去し、終了した。

(2) 当初計画からの変更点（研究手法の変更点等）

(副課題 1) 衛星データ同化技術及び全球同化システムの改良

変更なし。

(副課題 2) メソスケール高解像度同化システム及びアンサンブル摂動作成法の改良

中間評価時では「アンサンブル摂動作成法の改良」としていたが、アンサンブル予報結果を用いた確率情報にも取り組むこととし、「アンサンブル摂動作成法の検証」に変更した。「陸面・都市・海洋等の結合同化の有効性を調べ、有効な場合にはそれらの開発を行う」ことを取りやめにした。

(副課題 3) 衛星・地上放射観測および放射計算・解析技術の開発

NOAA/NESDIS から導入したひまわり火山灰アルゴリズム (VOLCAT) は、アルゴリズムの特殊性などの理由で当初考えていた改良が難しいことがわかってきた。VOLCAT については次のバージョンアップによる改善の調査と気象研開発の火山灰アルゴリズム (OVAA) との比較実験を行い、気象研での開発は OVAA を主とすることにした。

マイクロ波放射計観測網の整備に伴い、マイクロ波チャンネル特性に対応した 1DVar 解析用放射伝達モデル等の開発を追加した。

(副課題 4) 地上リモートセンシング技術及びそれらをコアとした水蒸気等の観測技術に関する研究

変更なし。

(3) 成果の他の研究への波及状況

(副課題 1) 衛星データ同化技術及び全球同化システムの改良

- ・本課題で整備している気象研全球 NAPEX は、大気海洋結合同化に関する研究 (M 課題) でも基盤システムとして用いられている他、全球モデル検証や他の課題に関連した観測システム実験でも利用されている。
- ・観測インパクト調査や気象研メソ NAPEX 導入、気象庁本庁の計算機移植、JAXA 等の庁外研究機関との協力等にも有効な環境や情報を提供している。観測誤差共分散行列の高精度推定による観測情報の拡充については、現業化を目指して数値予報課と協力して進めている。
- ・Aeolus 衛星やひまわり輝度温度高度利用についても、数値予報課と定例会や勉強会で進捗を報告するなど、緊密に情報を共有しながら進めている。
- ・衛星搭載 DWL 同化について、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) や東京都立大学と連携して進めており、日本における将来の DWL 検討や衛星シミュレータ高度化に寄与している。

(副課題 2) メソスケール高解像度同化システム及びアンサンブル摂動作成法の改良

- ・NHM-LETKF を用いたアンサンブル同化システムは、「富岳」成果創出加速プログラム「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」、「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第2期「国家レジリエンス (防災・減災) の強化」『V. 線状降水帯の早期発生及び発達予測情報の高度化と利活用に関する研究』」、筑波大学との共同研究において用いられている。
- ・AI を用いたモデルパラメータ推定やライダー品質管理手法は理化学研究所 AIP と気象庁の共同研究の成果となる。
- ・地上設置型マイクロ波放射計による観測データ同化のインパクトを調べた成果は SIP2 期からの協力による。
- ・SAR データ同化によって台風予報に対するインパクトを調べた JAXA との共同研究に基づく。

(副課題 3) 衛星・地上放射観測および放射計算・解析技術の開発

- ・本課題で開発した昼夜対応の全天カメラについて、高層気象台、東北大学、環境研に導入した。
- ・スカイラジオメータの解析ソフト Skyrad pack MRI version 2.1 を応用し、インドの国立大気科学研究所の研究者と共同で、SAGE III/ISS のリムサウンディングによる成層圏エアロゾルの光学的厚さの観測からエアロゾルの数濃度粒径分布を導出する手法を開発した。
- ・全天カメラの校正手法を、JAXA、山梨大学、千葉大学と共同で開発中の GOSAT シリーズ地上検証用のカメラ型分光放射計に応用したソフトウェアを開発し、プログラムを共有した。

- ・産総研（フラックスネット）、環境研（GOSAT/GOSAT-2 検証）、金沢工大などのスカイラジオメータは、気象研究所の基準器と比較検定することで観測精度を維持しており、それぞれの機関の研究推進に貢献した。また、比較検定されたスカイラジオメータは地球観測衛星 GCOM-C の地上検証で使用されている。
- ・2020 年 8 月上旬に福岡に到達した西之島火山性由来気塊の地上 In-situ 観測データの解析では、気象研究所の BC 測定器のデータが使われ、研究成果が福岡大学総合研究所ニュース&レポートにおいて報告されている。

（副課題 4）地上リモートセンシング技術及びそれらをコアとした水蒸気等の観測技術に関する研究

- ・船舶搭載 GNSS に関し、国産測位衛星システムである準天頂衛星システムから配信される軌道情報を利用して、内閣府準天頂衛星システム戦略室が注目している。
- ・長崎での水蒸気ラマンライダー観測データは、「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第 2 期「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」『V. 線状降水帯の早期発生及び発達予測情報の高度化と利活用に関する研究』において、防災科学研究所や福岡大学で利用されている。

（4）事前・中間評価の結果の研究への反映状況

中間評価において、以下のような評価をいただきました。

- ・適切な副課題を設定し、新しい観測の取り込みやデータ同化技術の高度化が精力的に進められている。非常に順調に計画が進んでおり、現時点で既に分かりやすい成果が十分に挙げられている。
- ・特に船舶 GNSS の観測結果をもとに線状降水帯の予測が改善されたという結果は社会的にもインパクトのある成果になっている。
- ・線状降水帯などの集中豪雨の予測可能性なども精力的に調べられており、メンバー数を大幅に増やすことにより予測精度が向上することが示され、将来の展開が期待される。
- ・新規衛星 Aeolous の風データの同化のインパクト調査、非線形性・非ガウス性現象に強い粒子フィルタの開発なども成果が出ている。メソスケール以外の全球スケールの課題も着実に成果を挙げている。
- ・今年度は新型コロナウイルス感染拡大によって、観測研究全体が非常に困難な状況で実施を迫られることになった。そんな中、遅滞なく成果を挙げていることは特筆に値する。

中間評価でいただいた次の指摘事項について、以下の様に対応している。

- （コメント）学術界では、高度に複雑化したデータ同化技術を用いて研究を展開すること必ずしも容易ではない。しかし、最新システムを用いた様々な角度からの研究が展開できれば、官・学の両者にとって有益であろう。気象庁・気象研の限られた資源の範囲のとどめず、「学」も巻き込んで広く研究を展開するよう心掛けて頂きたい。
- （対 応）データ同化技術を用いる研究については、複数の「大学との共同研究」等に取り組んでいる。気象研究所の緊急研究「集中観測等による線状降水帯の機構解明研究」でも、大学の研究者の方との連携した研究が進められていて、気象観測研究部でも協力する形で進めている。
- （コメント）衛星・地上放射観測および放射計算・解析技術の開発については、九州・沖縄でのスカイラジオメータ観測解析の結果が報告された。今後は SKYNET や AERONET による多地点観測網の観測データを融合していくような研究が進むと発展性が高まるのではないかと。
- （対 応）観測データの融合に関連して、Skyrad pack MRI version2 の検証のために、ヨーロッパの研究者と SKYNET と AERONET のプロダクトの比較を進めている。
- （コメント）海上の水蒸気の観測が重要であることが示されたのであれば、それを機動的に観測する方法として、航空機による観測を検討されるべきではないかと。
- （対 応）航空機観測は、気象研究所の令和 4 年度の緊急研究「集中観測等による線状降水帯機構解明研究」で実施されたが、関東地方を対象にした航空機観測を取り入れた課題を提案した科研費は採択されていない。引き続き、民間航空機の観測データである DAPs データ等の利用を含め、検討をしていきたい。
- （コメント）研究としての意義、面白さと社会実装の適否はかならずしも一致しない。出口を見据えて、つねにフィードバックをかけてほしい。
- （対 応）出口として、学会や論文による発表に加えて、気象庁の現業システムでの利用が挙げられる。今後も、「防災」と「学術」を両方に貢献できる研究を推進していきたい。

今後の研究の進め方

(副課題1) 衛星データ同化技術及び全球同化システムの改良

現在、進めている各衛星データ同化や全球データ同化処理開発は、引き続き改良や詳細な検証を進め、論文化や学会発表、数値予報課へのコードの提供等、結果のとりまとめを行う。特に全天候での赤外輝度温度同化、陸域での輝度温度データ同化手法の高度化や静止衛星晴天輝度温度観測の利用バンド拡大、観測誤差相関を考慮した高密度化や観測誤差の最適化は、現業数値予報システムへの数年以内の導入を予定しており、引き続き数値予報課と緊密な連携を行う。さらにその先を見据えた研究・開発、例えば、Aeolus 同化処理の高度化、ハイパースペクトル赤外サウンダの高度な処理、アンサンブルを用いた同化システム、場に依存した誤差相関処理、海面水温等境界付近の観測の同化などの研究開発を着実に進める。ひまわり後継衛星やDWLの観測システムを検討するためのOSSEは、本庁やJAXA等と連携しながら、より多くの事例での調査や同化処理の高度化等を行う。小型衛星の評価・同化について、外部機関と連携しながら進める。

(副課題2) メソスケール高解像度同化システム及びアンサンブル摂動作成法の改良

アンサンブル4次元変分法などの同化システムの同化実験を実施し、実験結果の評価を行う。さらに衛星観測データや二重偏波レーダー、水蒸気ライダー、マイクロ波放射計、SAR等の高頻度・高密度な観測ビッグデータについての特性を調べ、誤差相関や非ガウス性を考慮した同化法などの検討を取りまとめる。ハイパースペクトル赤外サウンダデータについて同化手法の検討を行い、その結果を取りまとめる。さらに大アンサンブルを用いたアンサンブル予測実験を行い、成果を取りまとめる。

(副課題3) 衛星・地上放射観測および放射計算・解析技術の開発

赤外サウンダ観測を利用した火山灰物質推定と、それに対応した散乱特性テーブルを用いたひまわり/GCOM-Cの火山灰雲解析を継続して実施し、その結果を論文としてまとめる。雲・エアロゾル・放射に関連した、地上・衛星リモートセンシングプロダクトについて、概ね計画どおり順調に進捗している。今後も計画通り研究を推進する。地上エアロゾル光学特性等の連続観測及びデータ解析、分光日射観測システムの開発及び同システムを利用した連続観測を実施し、放射計校正技術の開発を継続する。

(副課題4) 地上リモートセンシング技術及びそれらをコアとした水蒸気等の観測技術に関する研究

水蒸気ライダーによる観測をつくばと茅ヶ崎において行う。これまで蓄積してきた観測データの品質管理の向上を図り、複数年の水蒸気量のデータセットを作成し、副課題2に同化用データ、緊急研究課題「集中観測等による線状降水帯の機構解明研究」用データベースとして提供する。水蒸気ライダー等複数の観測データの同化実験を実施し、水蒸気の時・空間構造を高精度で解析することにより、豪雨の機構解析を行い、得られた成果をまとめる。水蒸気DIALについても開発・調整を行い、試験観測を実施するとともに、精度改善を図る。観測データの数値予測への効果の評価結果に基づいた最適な観測方法の検討結果をまとめる。

船舶搭載 GNSS による水蒸気観測について、令和4年度年までに気象庁船、海上保安庁船、民間船への実装が行われた成果をまとめる。

研究成果リスト

(1) 査読論文：21件

1. Satoru Yoshida, Tetsu Sakai, Tomohiro Nagai, Yasutaka Ikuta, Yoshinori Shoji, Hiromu Seko, Koichi Shiraishi, 2022: Lidar observations and data assimilation of low-level moist inflows causing severe local rainfall associated with a mesoscale convective system. *Monthly Weather Review*, Vol. **150**, No. 7, 1781–1798.
2. Yasutaka Ikuta, Masahiro Sawada, Masaki Satoh, 2023: Determining the impact of boundary layer schemes on the secondary circulation of Typhoon Faxai using radar observations in the gray zone. *Journal of the Atmospheric Sciences*, doi:10.1175/JAS-D-22-0169.1
3. Satoh, M., S. Matsugishi, W. Roh, Y. Ikuta, N. Kuba, T. Seiki, T. Hashino, and H. Okamoto, 2022: Evaluation of cloud and precipitation processes in regional and global models with ULTIMATE (ULtra-sItE for Measuring Atmosphere of Tokyo metropolitan Environment): A case study using the dual-polarization Doppler weather radars. *Progress in Earth and Planetary Science*, **9**.

4. 石橋俊之, 2023: 大気解析のための変分法データ同化における背景誤差共分散行列の根の定式化. *統計数理*, 第 **70** 巻 第 2 号, 181-193.
5. Toshiro Inoue, Hiroshi Ishimoto, Masahiro Hayashi, Johannes Schmetz, 2022: Cirrus Clouds Observed From Himawari-8. *Studies of Cloud, Convection and Precipitation Processes Using Satellite Observations*, 179-205.
6. Li, M., H. Letu, Y. Peng, H. Ishimoto, Y. Lin, T. Y. Nakajima, A. J. Baran, Z. Guo, Y. Lei, and J. Shi, 2022: Investigation of ice cloud modeling capabilities for the irregularly shaped Voronoi ice scattering models in climate simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **22**, 4809-4825, doi:10.5194/acp-22-4809-2022.
7. 新堀敏基, 林 昌宏, 石元裕史, 2023: 気象衛星による大規模噴煙解析—2022 年 1 月 15 日 トンガ海底火山噴火の事例—. *駿震時報 (論文)*. (in press)
8. Ming Li, Husi Letu, Hiroshi Ishimoto, Shulei Li, Lei Liu, Takashi Y. Nakajima, Dabin Ji, Huazhe Shang, Chong Shi, 2023: Retrieval of terahertz ice cloud properties from airborne measurements based on the irregularly shaped Voronoi ice scattering models. *Atmospheric Measurement Techniques*, **16**, 331-353, doi:10.5194/amt-16-331-2023.
9. 西澤智明, 工藤 玲, 及川栄治, 日暮明子, 2022: 衛星搭載ライダーによる全球エアロゾル観測. *計測と制御*, **61**, 5, 350-354. (in press)
10. Kenichiro Kobayashi, Le Duc, Takuya Kawabata, Atsushi Tamura, Tsutao Oizumi, Kazuo Saito, Daisuke Nohara & Tetsuya Sumi, 2023: Ensemble rainfall-runoff and inundation simulations using 100 and 1000 member rainfalls by 4D LETKF on the Kumagawa River flooding 2020. *Progress in Earth and Planetary Science*, **10**, 5.
11. 佐藤正樹, 佐藤芳昭, 八代 尚, 伊藤耕介, 筆保弘徳, 三好建正, 川畑拓矢, 坪木和久, 堀之内武, 岡本幸三, 山口宗彦, 中野満寿男, 和田章義, 金田幸恵, 辻野智紀, 2022: 今後の台風予測研究に関する展望. *天気*, **69**, 285-294
12. Takahashi, A., T. Sakai, T. Kawabata, S. Yoshida, and N. Ueda, 2022: Balance plot for visualizing and examining tradeoff between accuracy and data quantity of lidar water vapor measurement data. *レーザセンシング学会誌*, **3**, 124-135. (in press)
13. 川畑拓矢, 上野玄太, 2022: 雲解像粒子フィルタを用いた積乱雲の非ガウス性に関する研究. *統計数理*, **70**, 133-151.
14. Ken Sawada, Naoko Seino, Takuya Kawabata, and Hiromu Seko, 2023: Impacts of an Urban Canopy Scheme and Surface Observation Data on a Heavy Rain Event through Data Assimilation. *SOLA*, **19B**, 1-4, doi:10.2151/sola.19B-001. (in press)
15. Bomidi Lakshmi Madhavan, Rei Kudo, Madineni Venkat Ratham, Corinna Kloss, Gwenael Berthet, Pasquale Sellitto, 2022: Stratospheric aerosol characteristics from the 2017-2019 volcanic eruptions using the SAGE III/ISS observations. *Remote Sensing*, **15**. (in press)
16. 酒井 哲, 2022: ライダーによる地上からの水蒸気鉛直分布計測. *計測と制御*, **61**, 366-371
17. Khaykin, S., A. Podglajen, F. Ploeger, J. Grooß, F. Tence, S. Bekki, K. Khlopenkov, K. Bedka, L. Rieger, A. Baron, S. Beekmann, B. Legras, P. Sellitto, T. Sakai, J. Barnes, O. Uchino, I. Morino, T. Nagai, R. Wing, G. Baumgarten, M. Gerding, et al., 2022: Global perturbation of stratospheric water and aerosol burden by Hunga eruption. *Communications Earth & Environment*, **3**, 316, doi:10.1038/s43247-022-00652-x.
18. 清野直子, 澤田 謙, 川端康弘, 瀬古 弘, 2022: 都市気象予測の現状と課題 —都市気象予測の発展を目指して—. *気象データ分析の高度化とビジネス利用*, 49-56.
19. 吉田 智, 2022: 水蒸気ライダー観測とデータ同化による線状降水帯に伴う降水量予測精度の向上. *計測と制御*, **61**, 372-376.
20. 瀬戸里枝, 鼎信次郎, 2023: 仮想観測シミュレーションとOSSEを組合せた小型マイクロ波衛星群データ同化による短期降水予測可能性と要求観測性能の評価法の提案. *水工学論文集* Vol. **78**, No. 2, 511-516

21. Hosono, T., S. Nakashima, M. Tanoue and K. Ichiyanagi, 2022: Monsoon climate controls metal loading in global hotspot region of transboundary air pollution. *Scientific Reports*, **12**, 11096.

(2) 査読論文以外の著作物（翻訳、著書、解説等）：1 件

1. Sawada Ken, Seino Naoko, Kawabata Takuya, and Seko Hiromu, 2022: Effects of an Urban Canopy Scheme and Surface Observation Data on a Heavy Rain Event through Data Assimilation. *CAS/JSC WGNF Research Activities in Earth System Modelling*, **52**, 115–116

(3) 学会等発表

ア. 口頭発表：58 件

・国際的な会議・学会等：13 件

1. Akihito Umehara, Satoru Yoshida, Syugo Hayashi, Nobuhiro Nagumo, Hiroshi Yamauchi, Eiichi Yoshikawa, Analysis of Charge Structure in a Typical Deep Convection Using C-band Polarimetric Radar and LF-band Three-dimensional Lightning Mapper, 2023/1/31, 11th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, ERA40 2022 Program Committee, PalaCinema Locarno.
2. Fujita Tadashi, Kozo Okamoto, Hiromu Seko, Michiko Otsuka, Hiromi Owada, Masahiro Hayashi, Mesoscale OSSE for the potential impact of a geostationary hyperspectral infrared sounder, 2022/11/17, 12th Asia Oceania Meteorological Satellite Users' Conference, 2022 年 11 月, 気象庁, オンライン
3. Ikuta, Y. and U. Shimada, Assimilation of Sea Surface Wind by Synthetic Aperture Radar in Typhoon Cases, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
4. Oizumi Tsutao, On Non-Gaussianity in Cumulonimbus Prediction using a Storm-Scale Particle Filter, Mathematics of the weather, 2022 年 10 月, Germany, Bad Orb
5. Okabe Izumi, and Kozo Okamoto, A statistical investigation about impact of Aeolus DWL data assimilation on forecasting skills for typhoons, AOGS2022 VIRTUAL 19th Annual Meeting, 2022 年 8 月, オンライン
6. Okabe Izumi, Kozo Okamoto and Toshiyuki Ishibashi, Effect of retrieval of land surface temperature derived from CSRs at window band on assimilation of CSRs at CO₂ band, EUMETSAT Meteorological Satellite Conference 2022, 2022 年 9 月, ベルギー, ブリュッセル
7. Okabe Izumi, Kozo Okamoto and Toshiyuki Ishibashi, Effect of retrieval of land surface temperature derived from CSRs at window band on assimilation of CSRs at CO₂ band, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
8. Okamoto K., T. Ishibashi, I. Okabe, M. Hayashi, All-sky Infrared Radiance Assimilation in the Global Data Assimilation System at JMA, 19th Annual Meeting of Asia Oceania Geosciences Society, 2022 年 8 月, オンライン
9. Ota Yoshifumi, Miho Sekiguchi, and Yousuke Sato, Spatial-scale Characteristics of a Three-dimensional Cloud-resolving Radiation Budget based on Monte Carlo Radiative Transfer Simulations, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
10. Sakai Tetsu, Satoru Yoshida, Tomohiro Nagai, Yasutaka Ikuta, Yoshinori Shoji, Comparison of lower tropospheric water vapor vertical distribution measured with Raman lidar and DIAL and their impact of data assimilation in numerical weather prediction model, 第 30 回国際レーザーレーダ会議, 2022 年 7 月, アメリカ, モンタナ
11. Seto Rie, and Yohei SAWADA, Development of cloud water content estimation method over land using AMSR2/AMSR3 measurements and ground-based microwave radiometer considering dynamic effects of land radiation, The Joint PI Meeting of JAXA Earth Observation Missions FY2022, 2022 年 11 月, (ハイブリッド)
12. Takuya Kawabata, Genta Ueno, On Non-Gaussianity in Cumulonimbus Prediction using a Storm-Scale Particle Filter, Mathematics of the weather, 2022 年 10 月, Germany, Bad Orb

13. Tanoue Masahiro, Hisashi Yashiro, Yuki Takano, Kei Yoshimura, Chihiro Kodama, and Masaki Satoh, Modelling water isotopes using a global non-hydrostatic model with explicit convection scheme, EGU General Assembly 2022, 2022 年 5 月, Austria, Vienna

・国内の会議・学会等：45 件

1. 青木輝夫, 八久保晶弘, 庭野匡思, 的場澄人, 谷川朋範, 西村基志, 石元裕史, 島田利元, 井上 峻, Gallet Jean Charles, 堀 雅裕, 山口 悟, 可搬型積分球積雪粒径測定装置の開発, 2022/10/3, 雪氷研究大会, 日本雪氷学会, 札幌コンベンションセンター
2. 荒木健太郎, 瀬古 弘, 石元裕史, 田尻拓也, 山内 洋, 吉本浩一, 松元 誠, 竹田智博, 河野宜幸, 鈴木健司, 中山和正, 地上マイクロ波放射計ネットワークの構築と初期観測, 2022/11/30, 線状降水帯機構解明に関する研究会 (第 6 回)
3. 荒木健太郎, 瀬古 弘, 石元裕史, 田尻拓也, 山内 洋, 吉本浩一, 松元 誠, 竹田智博, 河野宜幸, 鈴木健司, 中山和正, 地上マイクロ波放射計ネットワークの構築と初期観測, 2022/10/27, 日本気象学会 2022 年秋季大会, 日本気象学会, 北海道大学
4. 幾田泰醇, 瀬古 弘, 川畑拓矢, 清水慎吾, 地上設置型マイクロ波放射計輝度温度の 4 次元同化, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
5. 幾田泰醇, 瀬古 弘, 川畑拓矢, 石元裕史, 荒木健太郎, 田尻拓也, 清水慎吾, 吉本浩一, 竹田智博, 河野宜幸, 松元 誠, 鈴木健司, 中山和正, 地上設置型マイクロ放射計データ同化のインパクト, 線状降水帯機構解明に関する研究会 (第 6 回), 2022 年 11 月, オンライン
6. 幾田泰醇, 佐藤正樹, Woosub Roh, 松岸修平, 久芳奈遠美, 清水達也, 梅原章仁, 永戸久喜, 二重偏波レーダーを参照値とした雲微物理スキームの精緻化, 第 24 回 非静力学モデルに関するワークショップ, 2022 年 12 月, 茨城県つくば市
7. 石橋俊之, 全球大気と地球表面状態等の結合同化に向けて, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
8. 石元裕史, 林 昌宏, 石井憲介, 工藤 玲, 複数の衛星データを用いた赤外火山灰解析手法の開発, 日本気象学会 2022 年秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
9. 梅原章仁, 櫻井南海子, 吉田 智, 林 修吾, 清水慎吾, 山内 洋, 出世ゆかり, 二重偏波レーダー及び雷 3 次元観測システムを用いた 降水粒子と雷活動の比較解析, 2022/10/24, 日本気象学会 2022 年秋季大会, 日本気象学会, 北海道大学
10. 梅原章仁, 櫻井南海子, 吉田 智, 林 修吾, 清水慎吾, 山内 洋, 出世ゆかり, 二重偏波レーダー及び雷 3 次元観測システムを用いて考察する夏季積乱雲内部における降水粒子と電荷構造の対応, 第 17 回航空気象研究会, 日本気象学会, オンライン
11. 工藤 玲, 高野松美, 全天カメラによる雲分布・雲底高度分布の推定, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
12. 工藤 玲, 入江仁士, 西澤智明, 日暮明子, 藤谷雄二, 長谷川就一, 大河原望, 大島 長, Sang-Woo Kim, Pradeep Khatri, 竹村俊彦, 弓本桂也, 中川勝之, 地上・衛星観測によるエアロゾルの長期変動解析, 日本気象学会 2022 年秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
13. 岡部いづみ, 岡本幸三, 石橋俊之, リトリブド表面温度を用いた静止気象衛星 CO₂ バンドの晴天放射輝度温度データ同化, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
14. 岡部いづみ, 岡本幸三, Aeolus 衛星の視線風速データ同化による台風進路予測への寄与, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
15. 岡本幸三, 石橋俊之, 岡部いづみ, 林 昌弘, 静止衛星の全天候赤外輝度温度同化, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
16. 岡本幸三, 林 昌宏, 中川雅之, 幾田泰醇, 石田春磨, 岡部いづみ, 神代 剛, 川合秀明, 衛星搭載雲レーダーを用いた気象庁全球気象・気候モデルの検証, 日本気象学会 2022 年秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
17. 大泉 伝, 線状降水帯を知るーそのメカニズムと予測についてー, 第 2 回 スーパーコンピューター「富岳」成果創出加速プログラム シンポジウム「富岳百景」, 2022 年 12 月, オンライン

18. 川畑拓矢, 線状降水帯を知るーそのメカニズムと予測についてー, 第2回 スーパーコンピューター「富岳」成果創出加速プログラム シンポジウム「富岳百景」, 2022 年 12 月, オンライン
19. 酒井 哲, 瀬古 弘, 山内 洋, 佐藤英一, 足立アホロ, 吉田 智, 永井智広, 小司教禎, つくばにおけるラマンライダーとドローンによる水蒸気鉛直分布の比較観測, 第 40 回 レーザセンシングシンポジウム, 2022 年 9 月, 広島県福山市
20. 酒井 哲, 永井智広, 内野 修, 吉田 智, 小司教禎, 森野 勇, Richard Querel, Ben Liley, and Sergey Khaykin, トンガ火山噴火後につくばとニュージーランド・ローダーのライダーで観測された成層圏エアロゾル, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
21. 酒井 哲, バイサラ社製水蒸気 DIAL と気象研究所ラマンライダーの検証観測, 第 25 回大気ライダー研究会, 2023 年 3 月, 東京都中央区
22. 小司教禎, 三浦甚哉, 椿 修二, 東 吉一, 日比野祥, 小嶋 惇, 中村哲也, 習田恵三, 遅延量勾配を用いた船舶搭載 GNSS 可降水量の品質管理, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
23. 小司教禎, 三浦甚哉, 椿 修二, 東 吉一, 日比野祥, 小嶋 惇, 中村哲也, 習田恵三, 船舶搭載 GNSS によるリアルタイム可降水量解析とその品質管理, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
24. 小司教禎, 椿 修二, 日比野祥, 小嶋 惇, 長谷川拓也, 前原孝多, 齊藤一浩, 奥野功之, MADOCA-PPP 試験データを用いた船舶搭載 GNSS 可降水量解析, GPS/GNSS シンポジウム 2022, 2022 年 10 月, オンライン
25. 小司教禎, IGS 第 3 次再解析を用いた GNSS 可降水量再解析, 日本気象学会 2022 年秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
26. 瀬戸里枝, 牛山朋来, 小池俊雄, AMSR-E/AMSR2 を用いた陸域雲降水粒子の観測とその同化による短期降水予測手法の開発, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
27. 原圭一郎, 倉本浩志, 石井成美, 山崎明宏, 林 政彦, 福岡市内の大気エアロゾル中アンモニウム塩存在状態とその動態, 第 39 回エアロゾル科学・技術研究討論会, 日本エアロゾル学会, 慶應義塾大学日吉キャンパス
28. 田上雅浩, 八代 尚, 高野雄紀, 芳村 圭, 小玉知央, 佐藤正樹, Modelling water isotopes using a global non-hydrostatic model with explicit convection scheme for investigating model's bias and uncertainty, JpGU meeting 2022, 2023 年 2 月, 千葉県千葉市&オンライン
29. 田上雅浩, 中村 哲, 大島和裕, 一柳錦平, 朴 昊澤, 北極海の海水後退と大気水循環との関係, 日本気象学会 2022 年秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
30. 田上雅浩, 八代 尚, 芳村 圭, NICAM-LETKF を用いた水同位体データ同化システムの開発, 日本気象学会 2022 年秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
31. 田上雅浩, 八代 尚, 芳村 圭, NICAM-WISO による寒冷域での d-excess のバイアス分析, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, 東京
32. 谷川朋範, 増田一彦, 石元裕史, 大河原望, 中山雅茂, 海水の放射計算に必要な海氷面ラフネスの推定, 雪氷研究大会 (2022・札幌), 日本雪氷学会, 札幌コンベンションセンター
33. 新堀敏基, 林 昌宏, 石元裕史, 2022 年 1 月 15 日トンガ海底火山噴火により発生した傘型噴煙のひまわり 8 号による解析 (その 2), 日本火山学会 2022 年度秋季大会, 日本火山学会, オンライン
34. 新堀敏基, 林 昌宏, 石元裕史, 2022 年 1 月 15 日トンガ海底火山噴火により発生した傘型噴煙のひまわり 8 号による解析, 日本地球惑星科学連合 2022 年大会, 日本地球惑星科学連合, オンライン
35. 新堀敏基, 林 昌宏, 石元裕史, 2022 年 1 月 15 日トンガ海底火山噴火により発生した火山灰雲のひまわり 8 号による解析, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 日本気象学会, オンライン
36. 西橋政秀, 線状降水帯の予測精度向上を目指した水蒸気 DIAL の開発, 第 25 回大気ライダー研究会, 2023 年 3 月, 東京都中央区
37. 藤田 匡, 瀬古 弘, 川畑拓矢, 岡本幸三, スケールに依存する変分法データ同化の検討, 第 24 回非静力学モデルに関するワークショップ, 非静力学数値モデル研究連絡会, 筑波大学

38. 藤田 匡, 瀬古 弘, 川畑拓矢, 岡本幸三, ドップラー速度, AMV 同化の検討, 「線状降水帯の機構
解明・予測技術の向上」発表会, 気象研究所, オンライン
39. 藤田 匡, 瀬古 弘, 川畑拓矢, 岡本幸三, スケールを考慮した変分法による高頻度高密度データ
同化手法の検討, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 日本気象学会, オンライン
40. 山崎明宏, スカイラジオメータの内部温度測定の改良と温度特性について, 日本気象学会 2022 年度
秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
41. 吉田 智, 酒井 哲, 大気ライダー観測技術とその応用, フォトニック研究会 4 月研究会,
2022 年 4 月, オンライン
42. 吉田 智, 上里達実, 川畑拓矢, 酒井 哲, 高橋温志, 横矢直人, 上田修功, 教師なし機械
学習によるラマンライダーデータのノイズ除去 (2), 日本気象学会 2022 年度春季大会,
2022 年 5 月, オンライン
43. 吉田 智, 川畑拓矢, 酒井 哲, 幾田泰醇, 高橋温志, 横矢直人, 上田修功, 白石浩一,
機械学習を用いた水蒸気ライダーデータのデノイズ, 第 40 回レーザセンシングシンポジウム,
2022 年 9 月, 広島県福山市
44. 吉田 智, 川畑拓矢, 酒井 哲, 幾田泰醇, 高橋温志, 横矢直人, 上田修功, 白石浩一,
教師なし機械学習によるラマンライダーデータのノイズ除去 (3), 日本気象学会 2022 年度
秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
45. 吉田 智, 線状降水帯に関連した下層インフローの観測とデータ同化, 第 25 回大気ライダー
研究会, 2023 年 3 月, 東京都中央区

イ. ポスター発表:

- ・国際的な会議・学会等:
なし。

・国内の会議・学会等: 4 件

1. 瀬古 弘, 足立アホロ, 梅原章仁, 佐藤英一, 小司禎教, 酒井 哲, 吉田 智, 線状降水帯
の降水予報精度向上を目指した気象観測用ドローンを併用した水蒸気観測, 日本気象学会
2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
2. 瀬古 弘, 山内 洋, 梅原章仁, 佐藤英一, 酒井 哲, 足立アホロ, 福岡レーダーに
よる屈折率推定とドローン観測, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月,
札幌市
3. 瀬古 弘, 幾田泰醇, 川畑拓矢, 石元裕史, 荒木健太郎, 田尻拓也, 清水慎吾,
吉本浩一, 竹田智博, 河野宜幸, 松元 誠, 鈴木健司, 中山和正, メソ NAPEX
を用いた地上マイクロ波放射計可降水量の同化実験, 日本気象学会 2022 年度
秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
4. 瀬古 弘, メソ NAPEX を用いた地上設置型マイクロ波放射計洋上ドローンのデータ同化実験,
第 24 回非静力学モデルに関するワークショップ, 2022 年 12 月, つくば市

報道・記事: 3 件

1. 川畑拓矢, かんさい情報ネット ten. 「不可能を可能に…同じ場所に長時間大雨が降り続く
「線状降水帯」予測の現在地と課題」, 読売テレビ, 2022 年 6 月 28 日
2. 川畑拓矢, ウェークアップ「進歩・データで「線状降水帯」予測「富岳」で精度向上」,
日本テレビ, 2022 年 7 月 2 日
3. 川畑拓矢, 情報ライブ ミヤネ屋「独自・線状降水帯“大気のカ”影響・気象庁の「観測・
予測体制」は」, 日本テレビ, 2022 年 7 月 5 日

T 台風・顕著現象の機構解明と監視予測技術の開発に関する

研究年次：4年目／5年計画（令和元年度～令和5年度）

研究代表者：鈴木 修（令和元年度）、清野直子（令和2～3年度）
加藤輝之（令和4年度／台風・災害気象研究部 部長）

課題構成及び研究担当者

（副課題1）台風の発生、発達から温帯低気圧化に至る解析・予測技術の研究

副課題代表者：和田章義

〔台風・災害気象研究部〕柳瀬 亘、嶋田宇大、小野耕介、林 昌宏、辻野智紀

〔気象観測研究部〕岡本幸三

（副課題2）顕著現象の実態解明と数値予報を用いた予測技術の研究

副課題代表者：清野直子、益子 渉

〔台風・災害気象研究部〕廣川康隆、小野耕介、荒木健太郎、栃本英伍、末木健太、鈴木 修、
加藤輝之

〔気象予報研究部〕橋本明弘、林 修吾

（副課題3）顕著現象の自動探知・直前予測技術のための研究開発

副課題代表者：楠 研一

〔台風・災害気象研究部〕足立 透、猪上華子、鈴木 修

〔客員研究員〕新井健一郎、石津尚喜、藤原忠誠

（副課題4）先端的気象レーダーの観測技術の研究

副課題代表者：足立アホロ、山内 洋

〔気象予報研究部〕梅原章仁、永井智広、鶴沼 昂、足立 透、益子 渉、荒木健太郎、
鈴木 修

〔気象予報研究部〕林 修吾

〔気象観測研究部〕瀬古 弘、石元裕史、吉田 智

〔火山研究部〕佐藤英一

〔客員研究員〕小林隆久、石原正仁

研究協力者：【氏名（機関）】

小山 亮（気象庁大気海洋部気象リスク対策課アジア太平洋気象防災センター）

沢田雅洋（気象庁情報基盤部数値予報開発センター数値予報技術開発室）

宮本佳明（慶応義塾大学環境情報学部）

伊藤享洋、北畠尚子、清野直子／令和4年度、足立アホロ／令和4年度、（気象大学校）

金田幸恵／令和元年度（名古屋大学宇宙地球環境研究所）

中澤哲夫／令和元年度（気象研究所客員研究員）

筆保弘徳／令和元年度（横浜国立大学教育学部）

瀬崎歩美／令和4年度、岡部裕己／令和4年度、田巻優子（気象庁大気海洋部気候情報課）

津口裕茂（気象庁大気海洋部予報課、気象大学校）

南雲信宏（気象庁大気海洋部業務課気象技術開発室）

研究の動機・背景 ※現状、問題点、研究の必要性及び緊急性についても記載

（社会的背景・意義）

近年、台風および集中豪雨・大雪・竜巻等突風・局地的大雨（顕著現象）による気象災害が数多く発生しており（平成30年7月豪雨、台風21号など）、気象災害の「新たなステージ」（局地化・集中化・激甚化）に対応する実況監視・予測技術の高度化が求められている。さらにそれらの災害に対して国民の安全・安心を確保し、レジリエントな社会を構築するために、豪雨や竜巻等の実態を把握する気象レーダーや、災害を予測・察知してその実体を知る技術などの研究開発の推進が求められている。

(学術的背景・意義)

台風の構造変化は内部の力学・熱力学だけでなく、時空間スケールの大きな外部の大気海洋環境場の影響を受ける。また、顕著現象の詳細な構造や発生・発達プロセスの時空間スケールは非常に小さい。いずれの現象も、その機構は現在のところ未知な点が多く、その解明は自然現象の理解を深めることにより、気象学の発展に大きく寄与する。さらに風工学、災害科学など他分野との連携により、幅広い分野における学術の発展に貢献することが可能である。

顕著現象の自動探知・直前予測の膨大な観測データをリアルタイムで記録・転送・検索・可視化する技術、さらに深層学習を用いて災害をもたらすおそれのある範囲や現象の強さを抽出する技術の開発は、ビッグデータ高速処理技術や人工知能技術を気象学・防災減災技術への応用につなげる可能性がある。

最先端の気象レーダーである二重偏波レーダー、フェーズドアレイレーダーは、気象災害をもたらす多様な現象への研究利用が始まっている。しかしながら、特にフェーズドアレイレーダーについては学術研究の緒についたばかりであり、現象の理解と監視・予測技術の開発に向けた研究をより重層的に推進する必要がある。また、二重偏波レーダーによる降水強度の推定精度の向上や降水粒子の状態を正確に把握することは現象の理解と監視に不可欠であり、これに向けた研究が各国で精力的にすすめられている。

(気象業務での意義)

気象庁は産学官や国際的連携のもと、最新の科学技術に対応した観測や予測精度向上の技術開発が求められている。

台風の解析・予測技術の研究は、第4期国土交通省技術基本計画における技術開発事項の1つであり、台風予測精度向上のために必要である。さらに気象庁の地域特別気象中枢(RSMC)としての北西太平洋域における台風等の解析、予報改善に寄与する。

数値予報を用いた顕著現象予測技術の研究は、顕著現象の形成要因や環境条件からその発生可能性を予測する”診断的予測”技術の開発を通じて、気象庁が提供する半日前からの防災気象情報の高度化に資する。

顕著現象の自動探知・直前予測技術の研究開発、数分で起こる顕著現象の様相を気象レーダーにより正確かつ迅速に把握し、観測データに基づく新たな予測手法を構築することは、特に突風や竜巻の予測・観測能力の強化に貢献する。

また、高精度の降水強度推定や降水粒子の種別の分布の把握、時空間分解能の高い観測のためのレーダー観測技術の研究開発は、気象庁で平成31年度から現業利用を予定している二重偏波レーダー、国土交通省交通政策審議会気象分科会の提言(2018年8月)において導入が望まれているフェーズドアレイレーダーの利用技術の基礎となり、台風・顕著現象の理解と監視・予測技術の高度化に貢献する。

研究の目的**(全体)**

台風および集中豪雨・大雪・竜巻等突風等の顕著現象がもたらす気象災害を防止・軽減するため、最先端の観測・解析手法や高精度の数値予報システムを用い、これらの現象の機構解明と高度な監視予測技術の開発を行う。

(副課題1) 台風の発生、発達から温帯低気圧化に至る解析・予測技術の研究

台風の発生、急発達、成熟期及び温帯低気圧化へと至る構造変化を包括的に理解し、その予測可能性を評価する。国内外の研究者との連携の元、最先端の台風解析・予報技術を導入・検証する。これにより台風予報精度の改善につながる技術基盤を確立する。

(副課題2) 顕著現象の実態解明と数値予報を用いた予測技術の研究

集中豪雨・大雪・竜巻等、災害をもたらす顕著現象について、事例解析・統計解析による実態把握と機構解明を推進し、それに基づく診断的予測技術の開発を通して顕著現象の監視・予測精度向上に貢献する。

(副課題3) 顕著現象の自動探知・直前予測技術のための研究開発

竜巻等突風・局地的大雨など甚大な災害に直結する顕著現象の自動探知・予測技術の開発により、国民の安心・安全への貢献を目指す。

(副課題4) 先端的気象レーダーの観測技術の研究

最先端の気象レーダーの観測技術に関する研究を行い、降水観測の精度向上と新たな物理量の推定手法の開発を行うことにより、台風や顕著現象の機構解明と監視予測技術の改善に資する。

研究の目標

(全体)

(副課題1) 台風の発生、発達から温帯低気圧化に至る解析・予測技術の研究

最先端技術による様々な観測結果の解析や数値予報システムによる事例解析を組み合わせる技術を開発し、これを基盤として台風の発生、急発達、成熟期及び温帯低気圧化へと至る構造変化機構を解明する。また数値予報システムによる台風進路・強度及び構造変化等の予測可能性研究を通じて、予報誤差の要因に関する知見を得ることにより、予報精度向上及び数値予報システムの改善に貢献する。

(副課題2) 顕著現象の実態解明と数値予報を用いた予測技術の研究

集中豪雨や大雪、竜巻等、顕著現象の事例解析と統計解析から、災害をもたらす顕著現象の実態把握・機構解明を進める。さらに、最先端の数値予報システムを活用し、予報現業での顕著現象に対する診断的予測技術向上に資する知見・手法を得る。

(副課題3) 顕著現象の自動探知・直前予測技術のための研究開発

高速3次元観測が可能な研究用フェーズドアレイレーダーを含む気象レーダー観測で得られるビッグデータを、人工知能技術等でリアルタイムに処理し、災害をもたらすおそれがある竜巻等突風・局地的大雨の範囲や強さを自動検出する技術を確立する。さらに利用者向けにカスタマイズされた情報を提供するためのシステムを開発する。

(副課題4) 先端的気象レーダーの観測技術の研究

二重偏波レーダーによる観測技術の研究開発を行い、二重偏波パラメータなどから降水強度や粒径分布など降水に関する微物理量を抽出するための手法を開発する。開発した手法を用いて粒子判別等を行い、顕著現象の機構解明を行う。また、水蒸気や液水量など従来のレーダーでは行われてこなかった新たな気象物理量を推定する手法の開発を行う。さらに、フェーズドアレイレーダーによる観測データの品質管理および高頻度立体解析に関する技術開発を行い、顕著現象の理解と監視・予測技術の活用に関連して機能評価を行う。

研究成果**(1) 今年度得られた成果の概要**

(全体)

(副課題1) 台風の発生、発達から温帯低気圧化に至る解析・予測技術の研究**(a) 発生から温帯低気圧化に至る台風構造変化プロセスに関する研究**

- ・台風渦の発達と対流活動の関係を解明するため、米国の航空機搭載レーダーで観測された風データを利用し、発達事例における眼の壁雲内の対流活動の特徴を調べた。発達事例では鉛直質量フラックスが境界層直上から高度4km付近まで漸次増加し、高度10km付近までほぼ一定のプロファイルとなっていた。これは発達事例の対流活動が境界層内で収束した空気塊を十分上方に運べるほど強く、自由大気下層の渦のスピンアップに寄与していることを示す。
- ・極軌道衛星搭載のハイパースペクトル赤外サウンダ観測(HSS; 現在AIRS, CrIS, IASIに対応)データを用いて台風の眼の中の大気プロファイル及び台風強度(中心気圧)を推定する手法を開発している。この開発中の手法を用いて推定した中心気圧値を、航空機ドロップゾンデ観測(T-PARCII)およびベストトラックデータの中心気圧値と比較した。HSSから推定された大気プロファイルはGSM初期値と比べ、ドロップゾンデで観測された暖気核構造をよく再現し、また中心気圧値がベストトラック値により近づくことを確認した。本結果は気象衛星センター・気象研究所連絡会3分科会合同発表会にて報告した。

- ・2019 年台風第 19 号の温帯低気圧化における台風構造変化を非静力学大気モデル asuca を用いた数値実験結果から得られた温位の収支解析により調査した。温帯低気圧化時の暖気核構造の消失は、台風進行方向左側に形成された下層ジェットと接続する上昇流による断熱冷却がもたらしていることを明らかにした。
 - ・比較的に高い緯度で発生した 2012 年台風第 12 号について、JRA-55 再解析と非静力学モデル JMANHM を用いて詳細な発生メカニズムを解析した。特に、2012 年 8 月の亜熱帯域における傾圧性の強化、発生期の上層における中緯度からの高渦位擾乱の侵入、前線付近での対流強化からの台風への構造変化など、熱帯と温帯のプロセスの相互作用の重要性を示した。
 - ・2016～2020 年の台風の温帯低気圧化と偏西風ジェットの関係を台風の大きさにより大きい台風事例と小さい台風事例に分類し、低気圧位相空間解析及び対流圏上層風速等の台風中心位置を領域中心としたコンポジット解析を行った。小さい台風事例については南シナ海を通過した後に上陸する台風を除いた。小さい台風事例と比較して大きい台風事例においては台風強度は強く、台風域での降水量も多い傾向にあった。また対流圏上層において台風北東側にてリッジがより明瞭となり、偏西風ジェットの南北への変動がより大きくなった。大きい台風はトラフの東側において非対称化へより明瞭に構造変化しつつ、北東への移動を加速する傾向にあった。温帯低気圧化が完了する緯度は、小さい台風に比べてより高緯度であった。
 - ・WMO の第 10 回熱帯低気圧に関する国際会議 (IWTC-10) において、12 名の研究者・予報官で構成された相遷移の作業部会を K. Wood 博士とともにラポーターとして取りまとめた。前回までは温帯低気圧化だけであったテーマについて、熱帯低気圧化や亜熱帯低気圧化も含めて一般化し、研究・現業に関する最新動向や各現業機関の低気圧の判別方法などを調査し、報告書と発表資料を作成した。
 - ・IWTC-10 の作業メンバーとして、最大風速半径 (RMW) の推定手法について主要現業機関に対しアンケートを行った。多くの機関で RMW 推定が現業的に行われている一方、衛星画像を主とする主観推定に依存している実態を報告書にまとめた。
 - ・気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第 6 次評価報告書 (AR6) において、非常に強い熱帯低気圧の発生割合と強度最大規模の熱帯低気圧のピーク時の風速は、地球規模では、地球温暖化の進行と共に上昇していると評価されている。この評価の妥当性について、2つの台風ベストトラックデータセット (JTWC と RSMC-Tokyo) 及び気象庁ドボラック再解析データセットから、10 分平均最大風速を見積もった上で調査した。静止気象衛星データの利用開始年となる 1986～1987 年前後で「猛烈な」熱帯低気圧数の 10 年単位での変化は、JTWC では増加、TSMC-Tokyo では減少と明瞭な差を示した。この明瞭な差は、静止気象衛星データの利用開始年前後の「猛烈な」熱帯低気圧数のトレンド評価の違いに影響を与えていた。気象庁ドボラック再解析データセットに基づく「猛烈な」熱帯低気圧数の変化傾向は、JTWC 及び RSMC-Tokyo から得られた変化傾向と異なっていた。
 - ・応用気象研究部と共同で、1987 年から 2016 年までのドボラック再解析データを用いた「強い台風」の変化傾向を調査した結果、数や割合には線形的なトレンドが見られない一方、強い台風にまで発達する熱帯低気圧の発生位置や分布には大きな変動が見られることがわかった。
 - ・南緯 5 度から北緯 20 度、東経 120 度から 160 度の海域における 2000 年以降の海洋貯熱量の時間変化と台風強度との関係を気象庁及び米国合同台風警報センターの台風強度インデックスデータ (CI 数) を用いて調査した。TCHP は海水温 26℃以上の海水がもつ熱容量であり、26℃のかわりに露点温度を用いた改良 TCHP も解析に使用した。CI 数と積算 TCHP (発生から 6 時間毎に積算した量) には線形的な相関関係があること、2016 年以降の TCHP の増加は改良 TCHP を用いると見えないこと、つまり海面水温の上昇と同時に露点温度も上昇していることを示した。
- (b) 診断的台風予測技術開発と予測可能性研究
- ・急発達予測精度改善に向けて新しい説明変数の利用可能性を調査した結果、対流圏界面付近の環境場気温や強風半径など従来未使用の説明変数が急発達予測の判別に重要なこと、またその判別の閾値が台風強度に依存することがわかった。
 - ・2019 年台風第 19 号強化期の台風中心域におけるひまわり 8 号による輝度温度データと同領域におけるアンサンブルシミュレーション及び放射伝達モデルによる輝度温度データを組み合わせ、経験的直交関数 (EOF) 解析を行った。アンサンブルシミュレーションは水平解像度 1km 非静力学大気モデル JMANHM とその大気波浪海洋結合モデルを用いて、1つの初期条件、摂動を加えた 26 メンバー、2つの異なる海洋初期条件で行われた。代表的な 4つの EOF モードは、ドボラック法の分類パターンであるカーブバンド、中心の濃密域 (CDO) パターン、眼 (Eye) パターンといった

対称・非対称パターンを示した。海洋結合の EOF モードへの影響は強化初期にのみ現れたが、ひまわり 8 号観測との差に比べれば相対的に小さい。海洋結合と海洋の初期条件の違いは輝度温度に対し、定量的な影響を与えていたことが示唆された。

(c) 新しい台風解析・予測技術の導入による台風研究の推進

- ・ドップラーレーダー風速観測による台風循環推定の新手法を 2010 年台風第 10 号の多重壁雲構造に適用した。既存手法に見られた人工的なシグナルを抑制し、物理的に整合した風速推定が可能となった。実事例への適用において浮かび上がった問題に対処し、環境場の風を考慮した風速推定にも対応した。
- ・ひまわり 8 号の 30 秒間隔撮像（可視）に基づく雲追跡による風ベクトルの導出を用いて、台風 Haishen (2020) の眼における下層風の力学を調査した。雲追跡の結果から、下層の循環中心は台風の移動方向の後方に位置していること。距離 5 km 程度で全体の循環中心の周りを回っていることがわかった。この回転する過渡的な擾乱は角運動量を内側に輸送することがわかり、眼の中での接線風の増加や角速度の均一化を説明できる。これらの特徴は、代数的に成長する波数 1 の順圧不安定と解釈される。
- ・衛星観測された合成開口レーダー（SAR）風（1 分平均値相当）が気象庁ベストトラック（10 分平均値）と整合しているか調査した。ドボラック変換テーブルを用いて SAR 風の最大風速を 10 分平均相当風速に変換すると、SAR 風はベストトラックと整合する風速値になることがわかった。ベストトラックの強風半径はベストトラックとよく整合する一方、暴風半径は過小推定となっていた。発達事例や温低化事例はベストトラックの最大風速が過小傾向、衰弱事例は過大傾向なことも示唆された。
- ・SAR 風を真値に台風の面的風分布を推定する手法の開発に着手した。過去の GSM の風速分布や衛星雲分布と SAR 風分布の統計的關係から、GSM の風速分布を補正・推定する手法を試行した結果、十分に見込みのある手法であることがわかった。
- ・SAR 風など新しい風観測データの出現を踏まえ、気象庁における台風 10 分平均最大風速の推定手法の歴史を文献調査した。その結果、今日使用される中心気圧と最大風速の統計的關係は、実測に基づくよりはむしろ 1940 年に見出された実験式に由来すること、孤島や船舶での観測値、航空機観測等によって補正が加えられて確立されてきたことなどがわかった。
- ・2022 年台風第 11 号・第 12 号・第 14 号を対象として、ひまわり 8 号の 30 秒観測（領域 5 観測）を行い、即時解析のため画像データを解析サーバーに掲載した。台風第 11 号に関しては台湾レーダー画像ファイルを収集し、即時解析のため解析サーバーに掲載した。
- ・日本に上陸した 2022 年台風第 14 号について即時解析を実施し、その成果を気象研究所コロキウムで発表した。また、2 種類の非静力学大気モデル asuca と CReSS による数値シミュレーション結果を用いて急発達時の強度、構造の違いを相互比較した。シミュレートされたインフロー境界層に関して、CReSS の結果はドロップゾンドの観測をよく表現していた。この結果と asuca の結果との間に見られた構造の違いは乱流スキームの違いに起因していた。この結果は、急発達時の台風構造の再現において、乱流スキームの選択が重要であることを示唆する。
- ・2022 年台風第 4、5、8 号について、非静力学大気モデル asuca を用いて数値シミュレーションを実施し、その結果を即時解析結果として取りまとめ、解析サーバーに掲載した。
- ・2018～2019 年の台風及び台風に関わる災害について、国内外の研究者と連携して気象集誌・SOLA 合同特別号を企画し、掲載された全ての査読論文（気象集誌 8 編、SOLA8 編）の概要を台風事例ごとに取りまとめるとともに、今後の研究の展望を提示した。

(副課題 2) 顕著現象の実態解明と数値予報を用いた予測技術の研究

(a) 顕著現象の実態把握と機構解明のための事例解析的研究

- ・令和 4 年 7 月 4～5 日に高知県で発生した線状降水帯を対象に、レーダーデータの解析による降水システムの実態把握と、線状降水帯の発生・維持機構解明に向けた数値シミュレーションを実施した。レーダーデータの解析では、降水セル群を抽出し、その移動速度と降水強度変化を見積もる手法を開発した。線状降水帯の発生域とその上流・下流側とを比較し、線状降水帯の発生域・発生期間中は降水セルの移動速度が相対的に遅く、降水強度が強化傾向にあることが分かった。また、LFM と同様の 2 km 解像度で非静力学数値モデル asuca を用いた線状降水帯の再現実験を実施し、線状降水帯発生直前の初期時刻から積分を開始した計算では解析雨量の

総雨量をよく再現できることが分かった。一方、2 km 実験を境界値とした 400 m 解像度の実験を実施した結果、2 km 解像度実験に比べ総雨量の再現性が悪く、サブキロメートルの asuca を用いた線状降水帯シミュレーションの課題が明らかとなった。

- 令和 4 年 8 月 3～4 日にかけて山形県・新潟県で発生した集中豪雨の発生環境場を詳細に調査した。豪雨発生期間中、東北沖に停滞した低気圧とその南側の西～南西よりの風が収束場を形成し、豪雨発生域への水蒸気流入を強化していた。また、過去の類似事例との比較を行い、今回の事例では、特に大気下層の極めて顕著な暖湿気の流入が重要であることがわかった。
- 2021 年 7 月 10 日に九州南部に大雨をもたらした線状の降水システムについて、観測データや高解像度数値シミュレーションによる解析を行った。その結果、コールドプールの線状の降水システムの組織化に重要であるが、コールドプールが強過ぎると降水システムは幅の広い構造になるとともに対流の発達に阻害されることが示され、これまでの米国におけるスコールラインの研究結果と類似する特徴をもつことが明らかになった。
- 2022 年度に展開中の地上マイクロ波放射計データを用いた気温・水蒸気量の鉛直プロファイル推定手法 (1DVAR) を開発し、ゾンデ観測データを用いて検証を行った。その結果、第一推定値としたモデルやニューラルネットワークによる推定よりも高精度であることがわかった。この手法を用いて夏季の対流性降水事例の大気環境場の時間変動を調べたところ、降水開始前の 3～12 時間前から大気下層の水蒸気フラックス量が増大し、その結果水蒸気量が増大して大気の状態が不安定化していたことがわかった。
- 地上マイクロ波放射計データを用いた 1DVAR 手法による降水事例の環境場解析を行ったところ、大気下層では多量の水蒸気がある状況で中層に乾燥空気が流入して降水が終焉している事例があることがわかった。この事例では降水終焉後も大気下層の高温・多湿な空気塊の影響で CAPE などの安定指数は非常に不安定な値を示しており、大気中層も含めた安定度を監視することで実況監視・診断的予測の技術が向上する可能性があることが示唆された。
- 2022 年 6 月 16 日～7 月 18 日に、石垣島では通常の 1 日 2 回の高層ゾンデ観測に加えて、06UTC と 18UTC の 2 回の追加観測が実施され、観測データに見られた下層水蒸気場の日変化の特徴を調査した。高度 1 km 以下では、12UTC と 18UTC に極大、06UTC に極小となる日変化が確認でき、その振幅は高度 100 m～500 m で約 2 g/kg になることがわかったが、その要因については数値モデルの解析値・予報値の精度がよくないために特定することができなかった。

(b) 数値予報を活用した顕著現象の診断的予測技術に関する研究

- 今出水期に発生した線状降水帯の発生環境場を調査した。各事例の特徴として、対流有効位置エネルギーが 2000 J/kg 程度と顕著に不安定な場ではあったが、水蒸気フラックス量や大規模場の上昇流、可降水量などは事例毎に大きく異なっていた。7 月 18 日の長崎県対馬や山口県・福岡県の事例については水蒸気フラックス量や可降水量などが極めて大きく、線状降水帯の発生に好都合な場であった。
- メソアンサンブル予報に対してクラスター解析等を利用した顕著現象の複数気象シナリオ作成法について、予報作業に適するようクラスター内メンバーの時間方向の協同性を考慮できるよう拡張した。さらに地方共同研究において、本手法を地方官署が目する顕著現象に適用し、その有効性を調査した。その結果、2022 年 2 月 6 日に札幌市内の交通網が麻痺した局地的大雪に対して、実況対応となった当時の予報作業より 6 時間早く大雪の警戒情報を発表できる可能性があることがわかった。
- メソアンサンブル予報システムを利用した顕著現象の予測可能性向上を目指し、メソアンサンブル初期摂動に総観場の不確実性を反映できる手法の開発を行った。本手法により、夏季冬季ともに降水確率予測精度が改善するとともに、地方共同研究で行っている顕著現象の複数気象シナリオの予測精度も改善することが明らかとなった。
- 水平格子間隔 2 km の asuca を用いた成長モード育成法に基づく高解像度アンサンブル予報システムを開発し、線状降水帯事例における予測誤差の研究を行った。その結果、予測初期値に含まれる対流規模の誤差が重力波を介してメソスケール以上の大きなスケールに非線形的に伝播することがわかった。本成果は対流規模の非線形性が重力波を介して upscale することを始めて明らかにするとともに、線状降水帯などの顕著事例において、対流規模の初期値誤差がより大きな場の予測を困難にする原因となることを示唆している。

- ・静岡県に多くの突風もたらした 2021 年 5 月と活発な対流を伴っていたが突風の発生しなかった 2021 年 7 月の九州の線状降水システムについて、水平解像度 1 km のモデルを用いて、突風予測指数であるアップドラフトヘリシティの比較を行った。その結果、値に倍以上の違いがみられ、突風予測指数としての有効性が示された。
- ・台風の位置や中心気圧、総降水量等の特徴を定量的に考慮することで、従来の手法よりも適切に線状降水帯事例を抽出できるように改善を行った。この客観的な線状降水帯事例抽出手法と令和 3 年度に開発した空間変換・積算手法による解析雨量をもとに、30 年を超える線状降水帯事例の出現頻度や環境場の特徴に関する統計解析に着手した。その結果、線状降水帯の年間発生頻度は増加傾向にあり、長期再解析データからも現在は過去よりも線状降水帯が発生しやすい環境場となっていることが示唆された。

(副課題 3) 顕著現象の自動探知・直前予測技術のための研究開発

(a) 竜巻等突風に関するレーダー関連データの収集

- ・気象庁の竜巻等突風データベースと全国の空港気象ドップラーレーダーデータ（2009～2021 年）から、突風災害を発生させた夏季竜巻に関する 12,000 のパターンを抽出し、メタ情報（竜巻パターンかどうか）を付与したデータベースを整備した。我が国の夏季竜巻に関するレーダーパターンの唯一のビッグデータベースとして活用が期待される。
- ・上記とほぼ同期間の気象庁の竜巻発生確度ナウキャストデータ（2009～2022 年）を収集し、竜巻発生時のレーダーパターン、突風被害分布とも組み合わせた統計的な解析のためのデータベースの整備を行った。
- ・冬季新潟エリアにおける公共レーダーを用いた社会実装を念頭に、データ収集と教師データ整備を進めた。

(b) 深層学習モデルの開発・試作成果を取りまとめ

竜巻等突風に伴うレーダーパターンや関連する雲のカメラ映像を検出するモデル^{*)}について取りまとめ、今度の開発のための検討課題を抽出した。さらに線状降水帯の早期抽出への応用を検討した。

^{*)}ドップラー速度データ（VGG, ResNet, 3D VGG pool, 3D VGG drop, 2D-3D VGG）、解析雨量（ResNet）、カメラ映像の分類・検出（ResNet/Faster R-CNN）

(c) フェーズドアレイレーダーによる竜巻発生確度ナウキャスト等の高度化のための研究

竜巻発生確度ナウキャスト等の高度化を目的として、フェーズドアレイレーダーを用いた 3 次元渦探知・追跡技術の初期評価を行った。気象研究所および日本無線株式会社が所有するフェーズドアレイレーダーの観測圏内に発生した被害事例を対象として、当該技術を適用した試行実験を実施したところ、11 件中 8 件で被害域通過前から渦の発生・強化を立体的に捉えることに成功し、当該技術の高い有効性が示唆された。一方で、降雨減衰あるいは乾燥大気の流入によると考えられる渦パターンの部分的欠落や、渦の鉛直連続性に関するデータ取扱手法に起因した見逃しが生じることが明らかになった。今後、これらの課題を克服するため、技術の高度化に取り組む予定である。

(副課題 4) 先端的気象レーダーの観測技術の研究

(a) 偏波情報を用いた降水強度高精度推定に関する研究

C バンドレーダーにおける粒径分布パラメータ推定手法の精度検証を行った。既存手法では、周波数特性に依存する降雨減衰補正が考慮されていなかったが、Z-PHI 法による降雨減衰補正を適用することで、反射強度・反射因子差における降雨減衰の影響を適切に低減できることを確認した。

その上で粒径分布パラメータを求め、地上のディスドロメーターと比較したところ、偏波情報のノイズが少ない条件下で精度良く粒径分布パラメータが算出できることを確認した。

得られた雨滴粒径分布パラメータを用い、線状降水帯等による降雨特性について調べた結果、強雨時間帯においては雨滴粒径分布の形がほぼ変化しない場合があることが分かった。この場合、降水強度の増減が雨滴粒径分布の切片パラメータにより近似しうることを明らかにした。

地上で観測された雨滴粒径分布の時間変化は、雨滴粒径分布の鉛直分布と密接に関連しており、偏波情報から推定した雨滴粒径分布パラメータの有効性を確認した。

(b) 偏波情報を用いた粒子判別に関する研究

防災科学技術研究所との共同研究として、顕著な発雷と突風をもたらした事例を対象に、偏波情報による粒子判別結果とデュアルドップラー解析による鉛直流、及び三次元電荷分布とを比較し、下層正電荷と対応する粒子特性を調査した。また、開発した偏波情報を用いた粒子判別手法を、九州の大雨事例（線状降水帯含む）及び関東での顕著な降雹事例に適用し、それぞれ、降水粒子撮像ゾンデデータ、降雹情報（自治体や市民からの提供情報）と比較して、判別結果の妥当性及び改善点を確認した。さらに、検証用データの蓄積のため、降水粒子撮像ゾンデ観測を実施した。

(c) 偏波情報を用いた水蒸気、液水、雪水量推定に関する研究

- ・水蒸気や気温の情報を含む下層大気屈折率の時間変化量の推定のため、東京レーダー、福岡レーダーで観測されたレーダー位相データ及び位相の品質管理情報を収集するとともに、山頂から平野を観測するために厳密には視線が重ならない福岡レーダーでもレーダー位相から屈折率の時間変化量が推定できることを示した。レーダー位相から推定した屈折率の検証データ取得のため7月に筑後市で気象観測用ドローンを用いて高度500mまでの湿度・気温、水平風の鉛直分布の観測を行い、得られたデータをデータベース上に整理した。羽田の空港気象ドップラーレーダーのレーダー位相から推定した屈折率と東京スカイツリーの複数の高度で取得された気温・湿度のデータを比較し、レーダー位相の情報が地表近くの気温・湿度を反映していることを明らかにした。
- ・霰のX線マイクロCTデータを利用してサイズ・密度や融解による濡れをパラメータとした霰粒子モデルを開発し、DDA法による散乱特性計算からCバンド二重偏波レーダーでの各種偏波特性データベースを開発した。また積雪のマイクロCTデータを使って、任意のサイズー質量関係を満足する3次元雪片形状モデルを開発した。これらの成果について6月に防災科研主催の積雪ワークショップで報告を行った。

(d) フェーズドアレイレーダーを用いた観測技術に関する研究

フェーズドアレイレーダーを用いた反射強度および気流場の立体解析技術の機能評価のため、冬季ドライマイクロバーストの事例を対象とした解析・検証を行った。準天頂方向の観測データやVAD法を用いた鉛直・水平速度の推定、あるいはRHI・PPI断面の観測データに基づく低層外出流の推定を実施するとともに、これらを高層・地上気象観測及び近隣のドップラーレーダーによる観測データと比較した。その結果、概ね矛盾のない推定値が得られていることが明らかになり、現象の物理機構の考察が可能となった。

(2) 当初計画からの変更点（研究手法の変更点等）

特になし。

(3) 成果の他の研究への波及状況

(副課題1) 台風の発生、発達から温帯低気圧化に至る解析・予測技術の研究

- ・科学研究費補助金 新学術領域「変わりゆく気候系における中緯度大気海洋相互作用 hotspot」計画・公募研究、基盤研究及び若手研究等外部資金研究の推進に貢献している。ムーンショット目標8研究課題へ知見を共有している。第10回熱帯低気圧国際会議において、本課題の成果がワーキンググループのレポートに掲載された。

(副課題2)

線状降水帯に関する研究については、所内緊急研究「集中観測等による線状降水帯の機構解明研究」と連動して実施し、集中観測の実施やマイクロ波放射計の解析、線状降水帯の発生機構解明等の研究を行っている。マイクロ波放射計の解析などについての成果・知見は、予報技術指導やリモートセンシング気象観測研修などを通して本庁や各管区・地台に共有しているほか、本庁予報課・福岡管区气象台と意見交換をはじめている。また、メソアンサンブルを利用した決定論的予測技術の改善に関する研究では、札幌、仙台管区气象台と地方共同研究を実施し現業予報の改善に資する研究を実施するとともに、成果を本庁や福岡管区气象台にも共有している。竜巻等突風に関しては、東京工芸大学風工学研究拠点の共同利用・共同研究「日本版竜巻スケールおよびその評価手法に関する研究」を実施し、数値シミュレーション結果と解析結果は風工学分野の研究グループに提供され、被害分布推定等への利用されている。

(副課題3)

PRISM（官民研究開発投資拡大プログラム）における「AI を用いた竜巻等突風・局地的大雨の自動予測・情報提供システムの開発」および JR 東日本との共同研究において、深層学習を活用した竜巻等突風の実用化に向けた研究に貢献している。

また、副課題3（c）で得られた成果については、科学研究費補助金・基盤研究（C）「フェーズドアレイ気象レーダーを用いた竜巻の機構解明と三次元検出技術の開発」（21K03666）における竜巻の現象解析・技術開発に係る研究に応用している。

(副課題4)

開発した粒径分布推定アルゴリズム、降水粒子判別アルゴリズムを、所内緊急研究「集中観測等による線状降水帯の機構解明研究」において、線状降水帯内部の微物理量の解析に活用している。

(4) 事前・中間評価の結果の研究への反映状況

(副課題1) 台風の発生、発達から温帯低気圧化に至る解析・予測技術の研究

- ・台風の移動や強度変化の予測精度向上に資するため、気象庁現業非静力学気象モデル asuca を用いた研究を実施している。
- ・外部資金及び共同研究の枠組みを通じて大学・研究機関との連携の仕組みを構築し、台風解析・予測に関する研究を実施した。また査読論文等を通じて研究成果を社会へ発信している。

(副課題2)

- ・大学・本庁との連携

線状降水帯や竜巻等突風の実態解明の研究において、外部資金研究や共同研究の枠を利用し大学や他の研究機関、気象庁本庁関係者と連携して進めている。

- ・線状降水帯という用語の使用について

線状降水帯という用語について、学術的なものと気象庁現業で用いられているものに齟齬が生じているが、一般の方に混乱や誤解を生じないように本庁各部署と連携をとって対応をとっている。

(副課題3)

顕著現象の自動探知・直前予測技術について、深層学習を用いて冬季日本海における竜巻渦の探知などを行い大きな成果をあげたこと、さらに産官学連携も視野に入れた研究の実施が高く評価されたことを踏まえ、さらに適用範囲の拡大に資するような検討を進めている。

(副課題4)

レーダーによる降水強度推定、粒径分布推定、粒子判別を用いた研究について成果の取りまとめを行うとともに、線状降水帯の機構解明への適用を進める。

研究成果リスト

(1) 査読論文：19 件

1. Fudeyasu, H., U. Shimada, Y. Oikawa, H. Eito, A. Wada, R. Yoshida, and T. Horinouchi, 2022: Contributions of the large-scale environment to the typhoon genesis of Faxai (2019). *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **100**, 617–630.
2. Hirano, S., K. Ito, H. Yamada, S. Tsujino, K. Tsuboki, and C.-C. Wu, 2022: Deep Eye Clouds in Tropical Cyclone Trami (2018) during T-PARCII Dropsonde Observations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **79**, 683–703.
3. Hirockawa, Y., and T. Kato, 2022: Improvements of procedures for identifying and classifying heavy rainfall areas of linear-stationary type. *SOLA*, **18**, 167–172.
4. Horinouchi, T., S. Tsujino, M. Hayashi, U. Shimada, W. Yanase, A. Wada, and H. Yamada, 2023: Stationary and transient asymmetric features in tropical cyclone eye with wavenumber-one instability: Case study for Typhoon Haishen (2020) with atmospheric motion vectors from 30-second imaging. *Monthly Weather Review*, **1**, 253–273.

5. Kollias, P., R. Palmer, D. Bodine, T. Adachi, H. Bluestein, J. Cho, C. Griffin, J. Houser, P. Kirstetter, M. Kumjian, J. Kurdzo, W. Lee, E. Luke, S. Nesbitt, M. Oue, A. Shapiro, A. Rowe, J. Salazar, R. Tanamachi, K. Tuftedal, X. Wang, and D. Zrnica, 2022: Science Applications of Phased Array Radars. *Bulletin of the American Meteorological Society*. (in press)
6. Ono, K., 2023: Obtaining mesoscale singular vectors reflecting synoptic-scale uncertainty by projection in phase space. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. (in press)
7. Shimada, U., 2022: Variability of Environmental Conditions for Tropical Cyclone Rapid Intensification in the Western North Pacific. *Journal of Climate*, **35**, 4437-4454.
8. Suzuki, T., M. Kamogawa, H. Fujiwara, and S. Hayashi, 2022: Temporal and Spatial Evolution of Precipitation under the Summer Sprite Parent Mesoscale Convective Systems in Japan. *Atmosphere*, **13**, 1661.
9. Suzuki, T., M. Kamogawa, H. Fujiwara, and S. Hayashi, 2022: MCS stratiform and convective region associated with sprites observed from Mt. Fuji. *Atmosphere*. (in press)
10. Tochimoto, E., and W. Yanase, 2022: Structural and Environmental Characteristics of Western Baiu Frontal Depressions. *Journal of Climate*. (in press)
11. Wada, A., 2022: Editorial for the special edition on Typhoons in 2018 - 2019. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **100**, 851-853.
12. Wada, A., M. Hayashi, and W. Yanase, 2022: Application of Empirical Orthogonal Function Analysis to 1-km ensemble simulations and Himawari-8 observation in the Intensification Phase of Typhoon Hagibis (2019). *Atmosphere*, **13**, 1559.
13. Yamada, Y., T. Miyakawa, T., M. Nakano, C. Kodama, A. Wada, T. Nasuno, Y.-W. Chen, A. Yamazaki, H. Yashiro, and M. Satoh, 2023: Large ensemble simulation for investigating predictability of precursor vortices of Typhoon Faxai in 2019 with a 14-km mesh global nonhydrostatic atmospheric model. *Geophysical Research Letters*, **50**, e2022GL100565.
14. Yanase, W., K. Araki, A. Wada, U. Shimada, M. Hayashi, and T. Horinouchi, 2022: Multiple Dynamics of Precipitation Concentrated on the North Side of Typhoon Hagibis (2019) during Extratropical Transition. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **100**, 783-805.
15. Wada, Y., M. Tsurumi, S. Hayashi, and K. Michimoto, 2023: Synoptic meteorological conditions of gamma-ray glows in winter thunderstorms. *Progress in Earth and Planetary Science*. (in press)
16. 伊藤雄基, 小田僚子, 稲垣厚至, 清野直子, 2023: ドップラーライダーで観測された平均風速鉛直分布の変動. *土木学会論文集 B1 (水工学)*, **78.2**, 325-330.
17. 尾田春雄, 益子 渉, 友清衣利子, 野田 稔, 2022: 台風による屋根被害分布の分析と最弱リンクモデルに基づく被害確率推定. *日本風工学会論文集*, **47**, 18-26.
18. 加藤輝之, 2022: アメダス 3 時間積算降水量でみた集中豪雨事例発生頻度の過去 45 年間の経年変化. *天気 (論文・短報)*, **69**, 247-252.
19. 川口真司, 加藤輝之, 2023: 日本海側における寒気流入と大雪との関連性, *天気*, **70**, 65-76.

(2) 査読論文以外の著作物 (翻訳、著書、解説等) : 20 件

1. Inoue, T., H. Ishimoto, M. Hayashi, and J. Schmetz, 2022: Cirrus Clouds Observed From Himawari-8. *Studies of Cloud, Convection and Precipitation Processes Using Satellite Observations*, 179-205.
2. Wood, K., W. Yanase, J. Beven, S. J. Camargo, C. Fogarty, J. Fukuda, N. Kitabatake, M. Kucas, R. McTaggart-Cowan, M. S. Reboita, and J. Riboldi, 2022: Phase transtions. WMO 10th International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-10) Report, 675pp.
3. Wada, A., W. Yanase, and S. Tsujino, 2022: Numerical simulations of Typhoon Rai (2021) by two nonhydrostatic atmosphere models and an atmosphere-wave ocean coupled model. *WGNE RESEARCH ACTIVITIES IN EARTH SYSTEM MODELLING*, **52**, 09-05.

4. Wada, A., W. Yanase, and S. Tsujino, 2022: Numerical simulations of Typhoon Chanthu (2021) by two nonhydrostatic atmosphere models and an atmosphere-wave ocean coupled model. WGNE RESEARCH ACTIVITIES IN EARTH SYSTEM MODELLING, 52, 09-03.
5. Wada, A., 2022: The effects of oceanic initial conditions created from different reanalysis datasets on the intensity prediction of Typhoon Trami (2018). WGNE RESEARCH ACTIVITIES IN EARTH SYSTEM MODELLING, 52, 09-07.
6. 加藤輝之, 村松貴有, 2022: 竜巻環境発生場の気候変化と将来予測. 号外海洋, **63**, 海洋出版, 40-47pp, ISBN: 0916-2011.
7. 楠 研一, 石津尚喜, 足立 透, 鈴木 修, 新井健一郎, 藤原忠誠, 鈴木博人, 2022: 深層学習を用いたドップラーレーダーによる竜巻探知技術の開発. 日本風工学会誌, **172**, 218-223.
8. 佐藤英一, 2022: 2.2 台風・コラム. 強風被害の変遷と教訓 第3版, 15-43.
9. 佐藤正樹, 佐藤芳昭, 八代 尚, 伊藤耕介, 筆保弘徳, 三好建正, 川畑拓矢, 坪木和久, 堀之内 武, 岡本幸三, 山口宗彦, 中野満寿男, 和田章義, 金田幸恵, 辻野智紀, 2022: 今後の台風予測研究に関する展望. 天気, **69**, 285-294.
10. 栃本英伍, 柳瀬 亘, 2022: 非断熱ロスビー波 (Diabatic Rossby Wave) . 天気, **69**, 29-31.
11. 新野 宏, 益子 渉, 2022: 我が国における竜巻研究—気象学の立場から—. 月刊海洋, **63**, 8-22.
12. 野田 稔, 尾田春雄, 益子 渉, 竹内 崇, 友清衣利子, 2022: 台風による強風屋根被害の航空機調査とその結果. 日本風工学会学会誌, **47**, 128-133.
13. 益子 渉, 2022: 数値シミュレーションによるスーパーセル竜巻の発生機構に関する研究. 月刊海洋, **63**, 92-98.
14. 荒木健太郎, 2022: もっとすごすぎる天気の本 空のふしぎがすべてわかる!. KADOKAWA, 176pp, ISBN: 4046055863.
15. 荒木健太郎, 2022: くもコレ／すごすぎる天気の本. KADOKAWA.
16. 佐藤陽祐, 大友啓嗣, 井村裕紀, 藤野梨紗子, 近藤 誠, 荒木健太郎, 山下克也, 當房 豊, 2022: 2021年度「エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会」報告. 天気, **69**, 387-393.
17. 荒木健太郎, 2022: 雲というデータを読み解く. 情報処理, **63**, 326-327.
18. 荒木健太郎, 2022: 魔法のような空の風景 2023. インプレス, 28pp, ISBN: 4295014559.
19. 荒木健太郎, 2023: すごすぎる天気の本 雲の超図鑑. KADOKAWA, 176pp, ISBN: 4046060166.
20. 荒木健太郎, 2023: 地上マイクロ波放射計による大気熱力学場観測とその応用. 令和4年度予報技術研修テキスト, 1-85.

(3) 学会等発表 : 61 件

ア. 口頭発表 : 49

・国際的な会議・学会等 : 3 件

1. Adachi, T., and H. Niino, Analysis of Wintertime Dry Microburst Event Observed With Photography and Phased Array Radar, AOGS2022 VIRTUAL 19th Annual Meeting, 2022 年8月, オンライン
2. Shimada, U., and M. Hayashi, A comparison between SAR wind data and best track tropical cyclone data, JpGU meeting 2022, 2022 年5月, 千葉県千葉市&オンライン
3. Tsujino, S., T. Horinouchi, and U. Shimada, A new method to estimate circulations in tropical cyclones from single-Doppler radar observations, JpGU meeting 2022, 2022 年5月, 千葉県千葉市&オンライン

・国内の会議・学会等：53 件

1. 足立 透, 石津尚喜, 楠 研一, 猪上華子, 新井健一郎, 鈴木 修, 藤原忠誠, 鈴木博人, PAWR および CNN による竜巻性渦の立体検出技術の初期評価, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
2. 足立 透, 石津尚喜, 楠 研一, 猪上華子, 新井健一郎, 鈴木 修, 藤原忠誠, 鈴木博人, PAWR および CNN による竜巻性渦の立体検出技術の初期評価, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
3. 荒木健太郎, 瀬古 弘, 石元裕史, 田尻拓也, 山内 洋, 吉本浩一, 松元 誠, 竹田智博, 河野宜幸, 鈴木健司, 中山和正, 地上マイクロ波放射計ネットワークの構築と初期観測, 線状降水帯機構解明に関する研究会 (第 6 回), 2022 年 11 月, オンライン
4. 荒木健太郎, 瀬古 弘, 石元裕史, 田尻拓也, 山内 洋, 吉本浩一, 松元 誠, 竹田智博, 河野宜幸, 鈴木健司, 中山和正, 地上マイクロ波放射計ネットワークの構築と初期観測, 日本気象学会 2022 年秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
5. 荒木健太郎, 雲を愛する技術, 水を考えるつどい, 2022 年 8 月, 東京都千代田区
6. 荒木健太郎, 雲を愛する技術, ミネルバの会, 2022 年 8 月, 東京都
7. 荒木健太郎, 気候変動と豪雨災害, 気候変動対策フォーラム, 2022 年 9 月, つくば市
8. 荒木健太郎, 2020 年関越豪雪時の気象状況と降雪予測可能性, 第 4 回 JSTE シンポジウム, 2022 年 11 月, 札幌市
9. 荒木健太郎, 雪結晶で読み解く雲の心, 2022 年度積雪観測&雪結晶撮影講習会, 2022 年 12 月, オンライン
10. 荒木健太郎, 防災・減災のための雲科学研究, 自治体担当者向け茨城県表彰記念 Web 講演会, 2023 年 1 月, オンライン
11. 荒木健太郎, 吉本浩一, 瀬古 弘, 石元裕史, 地上マイクロ波放射計を用いた冬季日本海側の降雪雲の観測, 2022 年度エアロゾル・雲・降水に関する研究集会, 2023 年 3 月, オンライン
12. 石津尚喜, 藤原忠誠, 楠 研一, 鈴木 修, 足立 透, 新井健一郎, 猪上華子, 冬季日本海沿岸においてドップラーレーダーで観測された渦の統計解析, 日本気象学会秋季大会, 2022 年 10 月, 北海道札幌市
13. 石元裕史, マイクロ CT データとフェーズ・フィールド法を利用した降雪・積雪の 3D モデル, 積雪ワークショップ, 2022 年 6 月, (オンライン)
14. 梅原章仁, 櫻井南海子, 吉田 智, 林 修吾, 清水慎吾, 山内 洋, 出世ゆかり, 二重偏波レーダー及び雷 3 次元観測システムを用いた降水粒子と雷活動の比較解析, 日本気象学会 2022 年秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
15. 梅原章仁, 櫻井南海子, 吉田 智, 林 修吾, 清水慎吾, 山内 洋, 出世ゆかり, 二重偏波レーダー及び雷 3 次元観測システムを用いて考察する夏季積乱雲内部における降水粒子と電荷構造の対応, 第 17 回航空気象研究会, 2023 年 2 月, 日本
16. 小野耕介, 降水予報へのアンサンブル次元の利用, 第 6 回大アンサンブルとアプリケーションに関する研究会 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 テーマ 1, 2022 年 6 月, オンライン
17. 小野耕介, 降水予報へのアンサンブル次元の利用, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
18. 小野耕介, 時間軸を考慮したクラスタリングによる複数気象シナリオの作成, 日本気象学会 2022 年秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌
19. 小野耕介, 稲津 将, メソ対流系における予測誤差の非線形性と階層構造, 非静力学モデルに関するワークショップ, 2022 年 12 月, つくば市
20. 大竹秀明, 大関 崇, 今井正亮, 庭野匡思, 小野耕介, 太陽光発電システム上の積雪の動態ー 2022 年 2 月 20 日の多雪事例ー, 電気学会 電力・エネルギー部門 (B 部門) 大会, 2022 年 9 月, 福井

21. 加藤輝之, アメダス3時間積算降水量でみた集中豪雨事例発生頻度の過去45年間の経年変化, 日本気象学会2022年度春季大会, 2022年5月, オンライン
22. 加藤輝之: 線状降水帯研究に関するレビューと課題, 日本気象学会関西支部2022年度第1回例会, 2022年12月, 高知県高知市
23. 加藤輝之: 集中豪雨をもたらす線状降水帯～基礎研究が生み出した防災用語～, 第21回都市水害に関するシンポジウム, 2022年11月, オンライン
24. 加藤輝之, 永戸久喜, 瀬古 弘, 清野直子, 立花義裕, 中村啓彦, 滝川哲太郎, 瀬戸心太, 吉田 聡, 藤田実季子, 小松幸生, 山田広幸, 鈴木賢士, 清水慎吾, 坪木和久, 白石浩一, 川村誠治, 北井信則, 久保田拓志, 2022年梅雨期線状降水帯集中観測の概要, 日本気象学会2022年秋季大会, 2022年10月, 札幌市
25. 加藤輝之, 集中観測の実施状況の概要について, 線状降水帯の機構解明に関する研究会(第5回), 2022年9月, オンライン
26. 加藤輝之, 集中観測実施計画と観測データ・数値予報資料の共有(線状降水帯データベース), 線状降水帯の機構解明に関する研究会(第4回), 2022年6月, オンライン
27. 加藤輝之, 線状降水帯のレビューと今後の課題, 日本気象学会2022年度春季大会, 2022年5月, 東京
28. 楠 研一, カメラ映像に基づく積乱雲判別モデルの開発, 日本気象学会2022年秋季大会, 2022年10月, 札幌市
29. 嶋田宇大, P. Reasor, R. Rogers, M. Fischer, J. Zawislak, J. Zhang, and F. Marks, 発達ハリケーンの上層アップシアー左象限で観測される強い上昇流について, 日本気象学会2022年度春季大会, 2022年5月, オンライン
30. 嶋田宇大, 気象庁気象研究所の取組み, TRC 台風専門学校 世界一聞きたい台風の授業, 2022年8月, 横浜市
31. 嶋田宇大, 台風強度予測を抜本的に改善していくには?～2030年、2050年を見据えて～, 第3回TRCセミナー, 2022年11月, (オンライン)
32. 嶋田宇大, 林 昌宏, 台風の面的暴風分布推定に向けて, 第4回高・低気圧ワークショップ, 2022年8月, 東京都港区
33. 末木健太, 線状降水帯を発生させた降水セル群の移動と降水強度変化の解析, 「線状降水帯の機構解明・予測技術の向上」発表会, 2022年11月, つくば市
34. 末木健太, 線状降水帯を発生させる降水セル群の移動と降水強度変化の解析, 「線状降水帯の停滞メカニズムおよびその環境場形成に寄与する大気擾乱の階層構造の解明」に関する研究会, 2022年12月, 宮城県仙台市
35. 末木健太, 令和4年7月4～5日の高知の線状降水帯に関する事例解析, 数値予報事例検討会, 2023年1月, 東京都
36. 末木健太, 令和4年7月に高知で発生した線状降水帯のサブキロメートル解像度再現実験, 「線状降水帯の機構解明・予測技術の向上」発表会, 2023年2月, つくば
37. 立花義裕, 春日 悟, 万田敦昌, 山中晴名, 中村啓彦, 仁科文子, 加古真一郎, 滝川哲太郎, 安藤雄太, 西川はつみ, 加藤輝之, 清野直子, 榎本 剛, 吉田 聡, 藤田実季子, 野中正見, 黒潮 SST 前線近傍で実施した梅雨前線の三隻同期大気海洋格子点移動観測, 日本気象学会2022年度秋季大会, 2022年10月, 札幌市
38. 辻野智紀, 2019年台風Hagibisにおける温帯低気圧化の数値シミュレーション, 第4回高・低気圧ワークショップ, 2022年8月, 東京都港区&オンライン
39. 辻野智紀, 2019年台風Hagibisにおける温帯低気圧化の数値シミュレーション, 中緯度大気海洋相互作用の観測・解析に関する研究集会, 2022年9月, 津市
40. 辻野智紀, 2019年台風Hagibisの温帯低気圧化時に見られた非対称な風速構造—数値モデルasucaによる再現実験—, 日本気象学会2022年度秋季大会, 2022年10月, 札幌市

41. 辻野智紀, 堀之内武, 柳原晴臣, データ同化による気象衛星ひまわり 8 号風速推定データの台風強度予報へのインパクト, 2021 年度(令和 3 年度)名古屋大学 HPC 計算科学連携研究プロジェクト成果報告会, 2022 年 7 月, 名古屋市&オンライン
42. 栃本英伍, 令和 2 年 7 月 4 日に九州南部で豪雨を生じた梅雨前線低気圧への上層トラフの影響, 第 4 回線状降水帯機構解明に関する研究会, 2022 年 6 月, オンライン
43. 栃本英伍, 末木健太, 廣川康隆, 益子 渉, 新野 宏, 線状降水帯発生環境場における Entrainment を考慮した CAPE の特徴, 日本気象学会 2022 年秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌
44. 栃本英伍, 廣川康隆, 2022 年 8 月 3 日に山形・新潟で発生した集中豪雨に関わる循環場および環境場について, 第 6 回線状降水帯機構解明に関する研究会, 2022 年 11 月, オンライン
45. 林 昌宏, 衛星搭載ライダー・レーダー観測を用いたひまわり巻雲物理量推定値の検証, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
46. 廣川康隆, 災害をもたらす集中豪雨と線状降水帯の発生メカニズム, 大正大学地域構想研究所防災セミナー, 2022 年 5 月, オンライン開催
47. 廣川康隆, 加藤輝之, 新野 宏, 1989 年~2021 年に生じた線状降水帯の出現頻度の特徴, 日本気象学会 2022 年秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
48. 益子 渉, 2021 年 7 月 10 日に九州南部に大雨をもたらした降水システムの特徴(第 2 報), 日本気象学会 2022 年秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
49. 益子 渉, 2021 年 7 月 10 日に九州南部に大雨をもたらした降水システムの内部構造と発達・維持機構, 「線状降水帯の停滞メカニズムおよびその環境場形成に寄与する大気擾乱の階層構造の解明」に関する研究会, 2022 年 12 月, 宮城県仙台市
50. 益子 渉, 2021 年 7 月 10 日に九州南部に大雨をもたらした降水システムの発達・維持機構, 「線状降水帯の機構解明・予測技術の向上」発表会, 2022 年 11 月, つくば
51. 柳瀬 亘, Phase Transitions -IWTC-10 の作業部会より-, 第 4 回 高・低気圧ワークショップ, 2022 年 8 月, 東京都港区
52. 山田広幸, 伊藤耕介, 平野創一朗, 篠田太郎, 坪木和久, 林 昌宏, 和田章義, 加藤輝之, 梅雨前線における低圧場の形成と対流圏上層の北風との関係, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
53. 吉田 聡, 石井 智, 泉 智貴, 宮 湛秋, 澤田尚樹, 成田愛子, 藤田実季子, 川合義美, 加藤輝之, 小松幸生, 新青丸 KS-22-9 航海による東シナ海黒潮横断観測, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市

イ. ポスター発表 : 12 件

・国際的な会議・学会等 : 2 件

1. Adachi, T., N. Ishitsu, K. Kusunoki, H. Inoue, K. Arai, O. Suzuki, C. Fujiwara, and H. Suzuki, Preliminary Assessment of Volumetric Detection of Tornadic Vortex Using Phased Array Weather Radar and Convolutional Neural Network, AGU Fall Meeting 2022, 2022 年 12 月, 米国, シカゴ&オンライン
2. Umehara, A., S. Yoshida, S. Hayashi, N. Nagumo, H. Yamauchi, and E. Yoshikawa, Analysis of Charge Structure in a Typical Deep Convection Using C-band Polarimetric Radar and LF-band Three-dimensional Lightning Mapper, 11th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, 2023 年 1 月, Switzerland, Locarno

・国内の会議・学会等 : 10 件

1. 足立アホロ, 小林隆久, 梅原章仁, 山内 洋, 南雲信宏, 二重偏波レーダーによる雨滴粒径分布の推定(その 5), 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
2. 足立 透, 新野 宏, スマートフォンカメラとフェーズドアレイレーダーを用いた冬季ドライマイクロバーストの解析, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月

3. 鵜沼 昂, 山内 洋, 梅原章仁, 加藤輝之, 2021 年 8 月 13~14 日に九州北部で大雨をもたらした降水系の降水の強さに関する二重偏波レーダーを用いた解析, 気象学会 2022 年秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
4. 梅原章仁, 荒木健太郎, 山内 洋, 猪上華子, 南雲信宏, 二重偏波レーダーで判別した 2022 年 6 月 2, 3 日における関東の顕著な降雹, 日本気象学会 2022 年秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
5. 嶋田宇大, 林 昌宏, 台風ベストトラックと SAR 海上風の比較, 日本気象学会 2022 年秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
6. 瀬古 弘, 足立アホロ, 梅原章仁, 佐藤英一, 小司禎教, 酒井 哲, 吉田 智, 線状降水帯の降水予報精度向上を目指した 気象観測用ドローンを併用した水蒸気観測, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
7. 益子 渉, 2021 年 7 月 10 日に九州南部に大雨をもたらした降水システムの特徴, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, 東京
8. 万田敦昌, 春日 悟, 山中晴名, 立花義裕, 中村啓彦, 滝川哲太郎, 仁科文子, 西川はつみ, 安藤雄太, 加藤輝之, 榎本 剛, 吉田 聡, 飯塚 聡, 森井康宏, 青島 隆, 2022 年 6 月に東シナ海上で実施された高層気象観測で検出された湿潤絶対不安定層, 2022 年度日本海洋学会秋季研究発表大会, 2022 年 9 月, 名古屋
9. 柳瀬 亘, 栃本英伍, 渡邊俊一, 嶋田宇大, 北畠尚子, 吉田 聡, 平田英隆, 低気圧の多様性に関する気象研究ノートの構想, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
10. 和田章義, 西暦 2000 年以降の西太平洋海域における台風強度と海洋貯熱量変動との関係, 日本気象学会 2022 年秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市

(4) 投稿予定論文:

報道・記事: 33 件

1. 荒木健太郎 TBS テレビ (王様のブランチ) 「空のふしぎが楽しく学べる天気の本」2022 年 5 月 7 日
2. 荒木健太郎 日本経済新聞 「ゲリラ豪雨の雲に迫れ スカイツリーやスパコン活用」2022 年 5 月 29 日
3. 荒木健太郎 NHK (NHK スペシャル) 「いつ逃げる? どこへ逃げる? ~新・全国ハザードマップ 水害リスクを総点検~」2022 年 6 月 5 日
4. 荒木健太郎 月刊 News がわかる (2022 年 7 月号) 「「すごすぎる天気の凶鑑」の荒木さん教えて! 雲のふしぎ」2022 年 6 月 15 日
5. 荒木健太郎 読売中高生新聞 「温暖化 増える豪雨「線状降水帯」局地的に長時間」2022 年 7 月 15 日
6. 荒木健太郎 J-WAVE (HITACHI BUTSURYU TOMOLAB.) 「7 月は天気の急変による災害が多い月 気象を研究」2022 年 7 月 2 日
7. 荒木健太郎 J-WAVE (HITACHI BUTSURYU TOMOLAB.) 「7 月は天気の急変による災害が多い月 災害を研究」2022 年 7 月 9 日
8. 荒木健太郎 NHK NEWS WEB (News Up) 「夏休みは休暇じゃない? 自由研究に読書感想文 どうする 夏休みの宿題」2022 年 8 月 3 日
9. 荒木健太郎 朝日新聞デジタル 「「雲はなぜ浮かぶ」答えられる? 荒木健太郎さんに聞く天気 のひみつ」2022 年 8 月 25 日
10. 荒木健太郎 朝日新聞 「雲はどうして落ちてこないの? 「上昇気流」に支えられているから」2022 年 10 月 22 日
11. 荒木健太郎 Shitakke 「『天気の子』の気象監修を担当した”雲研究者”が語る「雲って人間 みたいなのところがあるんですよ」」2022 年 11 月 6 日
12. 荒木健太郎 Shitakke 「「天気の子」の気象監修者が選ぶ! 魅力的な「雲」ランキング第一位は? 見つけるコツも」2022 年 11 月 21 日
13. 荒木健太郎 NHK (サイエンス ZERO) 「“博士が子供だった頃” Vol.10 謎多き雲の解明に挑む! 雲研究者 荒木健太郎博士」2022 年 11 月 25 日

14. 荒木健太郎 NHK (サイエンス ZERO) 「“ほこり”が天気を変える!? 575 でカガク!? エアロゾル?」
2022 年 11 月 27 日
15. 荒木健太郎 こども新聞「冬の空をながめてみよう!」2022 年 12 月 5 日
16. 荒木健太郎 テレビ朝日 (ドラえもん) 「空であそぼう! 1 月 21 日 第 1 回「雲に落書きしてみよう!」」2023 年 1 月 21 日
17. 荒木健太郎 テレビ朝日 (ドラえもん) 「空であそぼう! 1 月 28 日 第 2 回「つかめる雲はある? ない?」」2023 年 1 月 28 日
18. 荒木健太郎 テレビ朝日 (ドラえもん) 「空であそぼう! 2 月 11 日 第 3 回「七色じゃない虹はある? ない?」」2023 年 2 月 11 日
19. 荒木健太郎 NHK 「トルコ・シリア大地震で拡散した“災害デマ”地震雲・人工地震ではない理由」
2023 年 2 月 14 日
20. 荒木健太郎 テレビ朝日 (ドラえもん) 「空であそぼう! 2 月 18 日 第 4 回「雲は部屋にかざれる? かざれない?」」2023 年 2 月 18 日
21. 荒木健太郎 テレビ朝日 (ドラえもん) 「空であそぼう! 3 月 11 日 第 5 回「雨は止められる? 止められない?」」2023 年 3 月 11 日
22. 荒木健太郎 福島中央テレビ (ゴジてれ C h u ! 3 部) 「吊るし雲について」2023 年 3 月 14 日
23. 加藤輝之 読売新聞オンライン「7 月の集中豪雨、45 年間で 3.8 倍に…温暖化の影響で線状降水帯が発生しやすく」2022 年 5 月 23 日
24. 加藤輝之 NHK (おはよう日本) 「「集中豪雨」の頻度 45 年間で 2 倍余増 特に梅雨時期に増加傾向」2022 年 5 月 30 日
25. 加藤輝之 RCC 中国放送 「「当たるのは 4 回に 1 回?」 “精度”は今後の課題 「線状降水帯予測」
2022 年 6 月 1 日
26. 加藤輝之 RCC 中国放送 「なぜ今回「予測情報」は出なかった? 日本海の「線状降水帯」の特徴 15 年前に初めて定義した専門家に聞くと…」2022 年 8 月 5 日
27. 加藤輝之 RCC 中国放送 「「線状降水帯」広まるきっかけ 77 人犠牲の広島土砂災害から 8 年～名付け親の研究者が語る予測に必要なこと～」2022 年 8 月 19 日
28. 加藤輝之 北陸朝日放送 「気候変動を考える 「線状降水帯」第一人者に聞く」2022 年 9 月 19 日
29. 加藤輝之 BuzzFeed News 「経験したことのない災害が起こる。気象庁の専門家が今伝えたい、日本の“危機”とは」2022 年 11 月 18 日
30. 加藤輝之 NHK NEWS WEB 「災害は夜間と休日に多たってほんと!? 調べてみると…」2022 年 11 月 29 日
31. 廣川康隆 西日本新聞 「特集記事: 豪雨災害 九州の 10 年」2022 年 7 月 4 日
32. 廣川康隆 西日本新聞 「山国川の全国初「氾濫危険情報」を検証 急激な水位上昇、どう対処?」
2022 年 8 月 31 日
33. 廣川康隆 NHK 和歌山放送局 「守る 紀伊半島豪雨 11 年 線状降水帯 研究の最前線に迫る」2022 年 9 月 7 日

その他 ((3) 「成果の他の研究への波及状況」関連)

なし。

C 気候・地球環境変動の要因解明と予測に関する研究

研究年次：4年目／5年計画（令和元年度～令和5年度）

研究代表者：須田一人（気候・環境研究部長）

課題構成及び研究担当者

（副課題1）異常気象のメカニズム解明と季節予測可能性の評価

副課題代表者：直江寛明

〔気候・環境研究部〕小林ちあき、原田やよい、今田由紀子、高薮 出、保坂征宏、遠藤洋和、
古林慎哉（併任）、高坂裕貴（併任）、竹村和人（併任）、南 敦（併任）、
前田修平（併任）

〔全球大気海洋研究部〕吉田康平、平原翔二、吉村裕正、石川一郎、高谷祐平、新藤永樹、
足立恭将

〔気象予報研究部〕仲江川敏之、川瀬宏明

（副課題2）地球温暖化予測の不確定性低減

副課題代表者：保坂征宏

〔気候・環境研究部〕水田 亮、遠藤洋和、行本誠史、辻野博之、直江寛明、小林ちあき、
原田やよい、今田由紀子、村上茂教（併任）、
小畑 淳（併任、令和4年5月から）

〔全球大気海洋研究部〕石井正好、出牛 真、神代 剛、吉田康平、平原翔二、吉村裕正、
石川一郎、高谷祐平、新藤永樹、足立恭将、大島 長、中野英之、
坂本 圭、浦川昇吾

〔気象予報研究部〕中川雅之、川合秀明、長澤亮二

〔応用気象研究部〕仲江川敏之、村崎万代、川瀬宏明、小畑 淳（令和4年4月まで）

（副課題3）大気中温室効果ガスの変動要因・炭素収支の解明

副課題代表者：坪井一寛

〔気候・環境研究部〕石島健太郎、石井雅男、藤田 遼、高辻慎也（併任）、雪田一弥（併任）

〔全球大気海洋研究部〕眞木貴史

（副課題4）海洋の生物地球化学循環と酸性化実態の解明

副課題代表者：辻野博之

〔気候・環境研究部〕遠山勝也、小杉如央、小野 恒、石井雅男、笹野大輔（併任）、
飯田洋介（併任）、佐藤克成（併任）

〔全球大気海洋研究部〕中野英之、豊田隆寛、坂本 圭、浦川昇吾、川上雄真

研究の動機・背景 ※現状、問題点、研究の必要性及び緊急性についても記載

（社会的背景・意義）

- ・ 人為的な温室効果ガスの排出によって、大気と海洋の温暖化が進み、気候が変化している。海洋では排出された二酸化炭素の吸収や温暖化によって海洋酸性化や貧酸素化も進んでいる。これらの変化は、国際社会に大きな脅威と認識され、2015年9月に国連総会で制定された17の持続可能な開発目標の中で、気候変動への対策や豊かな海を守る具体的な行動を求めている。2016年11月には温室効果ガス排出の抑制による地球温暖化の緩和に向けたパリ協定が発効した。世界経済フォーラムが公表したグローバルリスク報告書2018においても、異常気象、自然災害、気候変動緩和と適応の失敗3つは、世界が抱える30のリスクの中でも発生の可能性が最も高く、負の影響が最も大きいリスクに挙げられている。
- ・ 日本国内においても、観測史上かつてない猛暑や集中豪雨が、近年各地で発生し、人身や社会基盤に大きな被害を与えており、気候の変化が現実の問題として国民に広く認識されるようになった。こうした中、2018年5月には気候変動における海洋の役割や海洋酸性化の実態把握を目的に含む第三期海洋基本計画が閣議決定された。2018年12月には気候変動適応法が施行され、産業や自然・社会環境に関する様々な分野で、気候変動に対する効果的な適応策を推進することとなる。

- ・気候変動の緩和や適応に関する国内外の諸政策を立案し、啓発や技術開発・体制構築などを通じてこれらを実施するために、その根拠となる炭素循環や気候変動の実態、原因、メカニズムや、数年から100年スケールの予測に関する科学的知見の充実と、その不確かさの低減が、喫緊の課題として社会から求められている。同時に、気象・気候災害による被害を防止・軽減するため、異常気象の中長期予報精度の向上や極端気象のメカニズム究明も不可欠である。
- ・本課題が対象とする現象は、世界気象機関（WMO）の全球気候観測システム（GCOS）が掲げる7つの全球気候インディケーターのうち、雪氷圏のふたつを除く5つ（表面温度、海洋熱、大気CO₂、海洋酸性化、海面水位）を対象を含む。また、8つの補助インディケーターのうち、やはり雪氷圏の2つを除く6つを対象を含む。

（学術的背景・意義）

- ・本課題の内容は、世界気候研究計画（WCRP）が掲げる7つの重要課題のうち、気候システムにおける炭素循環の解明、十年規模変動予測、顕著な気象・気候変動の理解と予測、沿岸水位変化に関連する。
- ・地域的な気候や顕著な気象・気候現象に関するメカニズムの解明を実現するためには、大気と海洋等の結合作用を考慮した精緻な高解像度モデルによる気候再現・予測研究の展開が求められている。
- ・地球の放射収支に影響を与える温室効果ガスの長期的変動の実態を把握するための観測の継続に疑問を挟む余地はない。観測データに基づいて地球規模の炭素循環の把握にアプローチすることは目下の重要課題の一つである。また、近年の高度な海洋観測手法により、空間変動スケールの小さい海洋内部変動が卓越する、とりわけ日本近海の複雑な海洋構造の理解を深め、海洋および海洋炭素循環モデルの高度化を通して、モデルによる海洋変動の再現性を高めることが肝要である。これは海洋学の知見を増やすだけでなく、短期気象予測の高度化や温暖化による気候変動の解明に関わる研究展開につながる。
- ・温室効果ガスの気候影響評価や、気候システムの中でその役割を理解するためには、地球システムモデルを活用した気候研究が有効である。これによる研究成果を積み上げることにより、長期的な気候予測の精度向上が期待される。
- ・温室効果ガスは、もともと地球表層の炭素循環の構成要素であって、地球の放射収支に大きな影響を持つ微量気体群である。温室効果ガスの増加は地球の気候を決定する大気、海洋、陸、雪氷などの多様な要素の相互作用を通して気候システムの変化を引き起す。したがって、人為的に排出された温室効果ガスの動態や、その増加が引き起こす気候変化の実態およびメカニズムを解明することは、気候システムと、その重要な一構成要素である炭素循環を理解する学術的な研究なしには成し得ない。
- ・気象研究所では、気象庁各課との密接な連携や、国内外の研究機関との共同研究により、季節予報や異常気象の理解、地球温暖化の実態把握と予測、大気と海洋の炭素循環の実態把握など、気候システムに関わる大気科学や海洋科学の諸分野の研究において、それらの黎明期から学術的に優れた業績を挙げるとともに、研究に必要なデータセットなどの基盤情報を学界に広く提供してきた。

（気象業務での意義）

- ・気象再解析、気候再現実験、季節予報実験、十年規模予測実験、温暖化予測実験、およびこれらに関連したデータ解析は、気候情報課における季節予報や解析業務の基盤情報となる。
- ・開発と実用化を進める世界最先端の観測手法は、世界気象機関の全球大気監視（WMO/GAW）やユネスコ政府間海洋学委員会等の全球海洋観測システムなどと連携して気象庁が実施している大気と海洋における温室効果ガスの現業観測の改善に活かし、その地球環境監視業務の充実と向上に貢献する。
- ・本課題で得られる研究成果は、気象庁のウェブサイトや、異常気象レポート、気候変動監視レポート、地球温暖化予測情報などの気象庁の刊行物の作成に貢献する。また、気候変動に関する政府間パネル第6次評価報告書や、世界気象機関気候ステートメント年報等に貢献する。

研究の目的

（全体）

- ・本研究課題では、大気と海洋の物理及び生物地球化学の長期観測と多様かつ高解像度のプロセス観測及びそれらのデータ解析や、精緻化された大気・海洋・生物地球化学過程を含むシステムの数値モデルの利用と解析を推進し、それらの研究の連携を強化する。これによって気候システムとその変化をより深く理解し、その諸現象の予測の不確実性の低減に資することで、社会に貢献する。

(副課題1) 異常気象のメカニズム解明と季節予測可能性の評価

- ・季節予測システム等を用いたアジア地域固有の気候現象と異常気象の季節予測可能性の研究、観測・長期再解析及びモデル実験等を用いた異常気象の実態解明と温暖化の影響の研究、そして気候研究に必要なデータ整備に関する研究を通して、季節予測の向上とその予測を用いた減災に資する情報を提供する。

(副課題2) 地球温暖化予測の不確実性低減

- ・地球システムモデルを実用し、地球温暖化予測や十年規模の気候変動予測のための研究基盤システムを開発する。高解像度の地球システムモデルを活用した実験を行うことで、気候メカニズムを理解し、全球及び地域スケールの気候の再現・予測の不確実性を評価・低減する。また、海洋の温暖化予測情報を充実させる。

(副課題3) 大気中温室効果ガスの変動要因・炭素収支の解明

- ・大気中の温室効果ガスの新しい観測・測定手法を開発し、多種類の大気化学トレーサー観測を実施して、西太平洋域における時空間変動を把握する。それらの観測情報に基づいて、温室効果ガスの変動要因を解析し、炭素収支を評価する。これらの活動を通じて、温室効果ガス排出削減の政策決定に科学的根拠を与える気象庁の現業温室効果ガス観測、WMO/GAWによる国際的な観測・解析、パリ協定のグローバルストックテイク等に貢献する。

(副課題4) 海洋の生物地球化学循環と酸性化実態の解明

- ・海洋の炭素循環や海洋酸性化について、新しい観測手法の開発や、従来の手法の改良を行う。それらによる観測データと数値モデルのデータを合わせて解析し、海洋炭素循環の変化や海洋酸性化の実態を評価するとともに、その原因を解明する。これによって、「持続可能な開発目標」や温室効果ガス排出削減の政策決定に科学的根拠を与える気象庁の現業海洋二酸化炭素観測や全球海洋観測システムの発展に貢献する。また、数値モデリングとの比較等を通じて、海洋酸性化の将来予測の向上にも貢献する。

研究の目標**(全体)**

- ・異常気象の実態解明、季節予測の可能性、地球温暖化、大気と海洋の炭素循環に関する長期かつ高解像度の観測及びモデル実験データベースを作成する。
- ・それらの解析や数値モデリングにより、炭素循環や気候変動の実態とメカニズムの理解を深めるとともに、過去気候再現と将来気候予測の不確実性を評価・低減する。

(副課題1) 異常気象のメカニズム解明と季節予測可能性の評価**① アジEMONスーンと台風の予測可能性評価**

- ・季節予測システムを用いた実験により、海洋・陸面と相互作用したアジEMONスーンの季節～数年の予測可能性を評価し、そのメカニズムを解明する。
- ・季節予測システムの再予報実験における台風の発生数等の予測精度を評価し、予測可能性の要因を解明する。

② 極端気象の実態と予測可能性の研究

- ・長長期再解析などのデータ解析と季節予測システムを用いたモデル実験を通して、極端気象の実態と発生メカニズムを明らかにする。
- ・大気モデルの大規模アンサンブル実験(d4PDF)を用いて、熱波、旱魃、豪雨といった極端事象の発生確率の季節(内)予測可能性を評価し、季節予測システムを用いて大気・海洋結合がそれらの予測可能性にどのような影響を及ぼすかを調べる。

③ 異常気象の実態解明と要因に与える大規模場の影響評価

- ・長期再解析データ、地上観測データ、モデル実験等を利用して、今後発生する異常気象の発生メカニズムの迅速かつ的確な情報提供に資するために、過去の異常気象の実態と発生メカニズム、温暖化寄与評価について大規模場の観点から研究を行う。

④ 気候データに関する研究

- ・異常気象の実態と発生メカニズムの解析、予測初期値、予測精度評価に必要な、気候研究の基盤となる長期再解析データなどを整備し、品質評価を行う。また、次世代の長期再解析の品質向上に資する同化インパクト実験や結合同化実験の評価を行う。

(副課題2) 地球温暖化予測の不確定性低減**① タイムスライス温暖化予測システム**

- ・地球システムモデルを用いた高解像度モデルによる温暖化予測システムを開発し、アンサンブル実験を行い、地域スケールの温暖化予測の不確実性を評価・低減する。また、これをもとに海洋の将来予測プロダクトの検討を行う。

② 十年規模気候変動予測

- ・地球システムモデルに組み込む初期値化スキームを開発し、十年規模予測実験を行い、全球及び地域スケールの十年規模の気候予測可能性や変動メカニズムについて考察する。また、これにより、モデル開発、初期値スキームの開発、予測情報の不確実性の低減に結びつける。

③ 気候再現実験

- ・気候モデルにより、歴史的観測データを整備・活用した長期気候変動再現システムを開発する。再現実験出力により長期気候変動の理解を進め、観測データに基づく百年スケールの気候変動研究領域を開拓する。

④ CMIP 実験の実施と気候変動メカニズム解明

- ・世界気候研究計画（WCRP）の第6期気候モデル相互比較プロジェクト（CMIP6）の各種温暖化実験を行い、国際比較のために実験出力をプロジェクトへ提出する。また、マルチモデル（CMIP6、CMIP5）等の各種データセット・実験を解析した結果をモデル開発にフィードバックするとともに、気候変動メカニズムの理解に役立てる。

(副課題3) 大気中温室効果ガスの変動要因・炭素収支の解明**① 化学トレーサの時空間変動に関する観測研究**

- ・気象庁の定常大気観測所（綾里、与那国島、南鳥島）や父島気象観測所の観測施設を利用して、ラドン、酸素や、二酸化炭素の炭素・酸素安定同位体比等の複数の大気化学トレーサの連続観測を実施する。これらのデータと、定常大気観測所で収集されている温室効果ガス濃度のデータを統合して、多種類の微量気体を含む高時間分解能の観測データベースを作成する。
- ・温室効果ガス測定の詳細ガス等の国内相互比較実験に参加し、観測基準や測定精度を評価する。また、実大気を用いた標準ガス調製システムを開発する。
- ・次世代のレーザー分光型分析計等を利用した観測・校正システムを開発する。
- ・代替フロンを含むハロカーボン類の連続測定技術を確立する。

② 化学トレーサ観測による炭素収支に関する解析研究

- ・観測データベースを用いて、ラドン (^{222}Rn) を指標とした清浄大気の詳細データ選別手法を確立し、温室効果ガスの広域代表性の高い変動を再解析する。
- ・酸素や二酸化炭素同位体比を用いた解析を実施し、他の手法とも比較検証を行って温室効果ガス濃度の変動要因・炭素収支を定量的に評価する。

(副課題4) 海洋の生物地球化学循環と酸性化実態の解明**① 高解像度観測や高精度分析による海洋炭素循環と酸性化実態の解明**

- ・水中グライダーによる観測方法と取得されたデータの品質管理技術を確立し、観測結果から時空間的に高解像度の海洋観測データセットを作成する。
- ・海水の pH 測定における不確かさ低減の手法や、アルカリ度の航走観測技術の確立により、海洋酸性化観測技術を改善する。

② データ解析による海洋物質循環の変動機構解明

- ・水中グライダーによる観測データから、中規模渦の物理・化学構造や、亜表層の酸素濃度の季節内変動など、海洋観測船では取得が難しい事象について知見を深める。
- ・気象庁観測船などによる北太平洋の長期観測データを解析することにより、この海域の表層及び中層における二酸化炭素など、生物地球化学パラメータの変動実態を定量的に評価し、その変動要因を解明する。
- ・海洋モデルや地球システムモデルの結果を観測結果と比較することにより、これらのモデルの性能を評価する。また、モデルの結果から、観測された海洋への二酸化炭素蓄積や酸性化の進行の実態について理解を深める。

研究成果

(1) 令和4年度に得られた成果の概要

(副課題1) 異常気象のメカニズム解明と季節予測可能性の評価

① アジアモンスーンと台風の予測可能性評価

- ・WMOの第10回熱帯低気圧国際ワークショップにおいて、熱帯低気圧の季節予測研究の進展について発表するとともに、報告書の取りまとめを行った。
- ・JMA/MRI-CPS3の再予報データなどを用いて中緯度海洋前線帯付近における季節予測可能性を調査した。

② 異常気象の実態解明と要因に与える大規模場の影響評価

- ・バレンツ-カラ海の海氷の季節予報への影響に関する論文を発表した (Komatsu et al., 2022, GRL)。チベット陸面の降水への影響に関する論文を発表した (Xue et al., 2022, BAMS)。2021年の西日本での記録的に早い梅雨入りに寄与した大気循環場に関する論文を発表した (Takemura et al., 2022)。
- ・2022年6月下旬から7初めの記録的猛暑について即時的イベント・アトリビューションを実施し、異常気象分析検討会にて報告、及び文部科学省と合同でプレスリリースを行った。国内IPCCシンポジウムや、IPCCのタスクフォース技術支援ユニットとして広報活動を行った。

③ 気候データに関する研究

- ・JRA-3Q本計算データについて品質・性能評価を行い、長期再解析推進懇談会、日本気象学会、JpGU、AGUで評価結果について報告と発表を行った。総合報告論文作成の4.3、8.1、8.2、9.2、9.3、9.5の執筆を行った他、全体を通しての推敲、修正等を協力して行った。

(副課題2) 地球温暖化予測の不確定性低減

① タイムスライス温暖化予測システム

- ・地球システムモデルを用いた高解像度モデルによる温暖化予測システムの開発・改良を継続した。特に台風強度・進路、梅雨・秋雨の振る舞い等の日本域のバイアス、それに影響を与える諸バイアスについて検討し、改良を進めた。また、アンサンブルの将来実験で用いる海水面温度・海氷密接度等の強制データについて、シナリオ、内部変動、モデルの不確実性(幅)を包括するべく、観測にある数年～十年規模の内部変動の導入、CMIP6モデルの海水面温度のばらつきを取り込める作成方法について検討を進めた。
- ・20km全球大気大循環モデル(AGCM)、および60km全球モデルと20km領域気候モデル(RCM)力学的ダウンスケーリングを用いて、20世紀中頃から21世紀末までの連続したシミュレーションを行い、極端降水の再現には高解像度であることが必要であること、全球・日本域とも極端降水の頻度は昇温量とほぼ比例関係にあることを示した (Mizuta et al., 2022)。

② 十年規模気候変動予測

- ・数値実験結果を解析し、気候変動メカニズム及び十年規模変動予測に関する予測可能性の考察を進めた。
- ・CMIP6のDCPP実験を延長し、2021年11月を初期値とした十年規模予測を実施し、WMOのマルチモデル比較の活動に貢献した。
- ・十年規模予測に対する火山噴火の影響を調査するマルチモデル比較の国際共同研究に参加し、実験に着手した。

③ 気候再現実験

- ・歴史的観測データ(地上気圧、地上気温等)を整備・活用し、地球システムモデルにデータ同化する形で、過去百年間以上の長期再現計算を実施し、その解析に着手した。

④ CMIP6実験の実施と気候変動メカニズム解明

- ・観測された北半球平均降水量では数十年規模トレンドが負から正に転じるが、それにかかわるメカニズムをMRI-ESM2.0およびCMIP6マルチモデルを用いて調査した。ハドレー循環偏差とリンクする南北半球間の熱輸送・降水帯の南北シフト、ならびに、晴天長波放射冷却に関わる全球的な降水量変化を反映することを示した (Yukimoto et al., 2022)。
- ・地球温暖化予測において、確かな夏季東アジア海面気圧配置と不確かな気圧配置およびこれらの要因について、第6次結合モデル相互評価プロジェクト(CMIP6)の多数モデル実験に対するモデル間経験直交関数(EOF)解析をもとに、CMIP5の場合の結果との共通点に注目して考察した (Ose et al., 2022)。

- ・CMIP5 および CMIP6 マルチモデル解析を行い、将来気候変動の不確実性の最も大きな要因の一つである亜熱帯海洋下層雲量の温暖化時における変化を調べた。Kawai et al. (2017) で新しく提案した雲頂エントレインメントにもとづく指標 ECTEI は温暖化時に減少しており、ECTEI を用いて下層雲量の減少を矛盾なく説明できるとともに、その不確実性の幅をも狭められることを示した (Koshiro et al., 2022)。
- ・TSE-C 予備実験結果を用いて、気温・降水量の将来予測の不確実性について定量的評価を行った。
- ・これまでの気象研究所での気候モデル開発についてまとめた (行本, 2022)。
- ・「気候予測データセット 2022」の全球大気モデルデータ部分について、公開作業を進めるとともに、同解説書の執筆を行い、令和 4 年 12 月に公表した。「日本の気候変動 2020」について各機会に普及活動を行った。また、データ公開・解析システムの開発に着手し、特にセキュリティについて検討を行った (保坂, 2022)。

(副課題 3) 大気中温室効果ガスの変動要因・炭素収支の解明

①化学トレーサーの時空間変動に関する観測研究

- ・南鳥島、綾里、与那国島、父島において、ラドン、水素、酸素等の複数の大気化学トレーサー観測を継続した。
- ・ハロカーボン観測について、南鳥島に設置された気象庁の連続観測装置による観測をフラスコ分析と比較し、検証した。
- ・気象庁との標準ガス比較を年 2 回実施すると同時に、WCC メタン巡回比較、WMO ラウンドロビンに参加した。
- ・気象庁の次期更新の仕様検討の中で、多成分レーザー分光型分析計のこれまで得られた知見を反映した。実大気ベースの標準ガスの実用化は間に合わなかったが炭素同位体比が大気に近い二酸化炭素標準ガスへの変更を提案した。
- ・レーザー分光型分析計を採用した一酸化二窒素分析計による観測の実用化試験を継続し、大気観測所における実観測の準備を行った。
- ・次世代のローコストセンサーによる温室効果ガスの多点観測ネットワークの可能性を検討するための材料を得るため様々な試験を実施した。

②化学トレーサー観測による炭素収支に関する解析研究

- ・①で得られたラドン等各種観測データを利用し大陸の発生源の影響を強く受けたデータを取り除き選別した時系列データベースによる解析を継続した。
- ・①で得られた酸素等の各種観測データを利用して、温室効果ガス濃度に対応する変動の関係性の解析を進めた。綾里のデータについては、時折、大船渡のセメント工場からの排出影響を受けた気塊を捉えていることがわかった。産総研が主著で論文をまとめた。与那国で観測された CO_2/CH_4 の濃度変動で中国の COVID 影響による排出量減が見られることが確認できた。国環研が主著で論文をまとめた。
- ・ CH_4 濃度・同位体観測とモデルの解析を行い産業革命以降の全球 CH_4 排出・消滅源の最適値推定を継続して論文をまとめた。

(副課題 4) 海洋の生物地球化学循環と酸性化実態の解明

①高解像度観測、高精度分析による、海洋炭素循環、酸性化実態の理解の促進

- ・水中グライダーによる令和 4 年 12 月に実施した観測で、本州南方海域において黒潮を横切ること成功し、黒潮を挟んだ、水温・塩分や生物地球化学パラメータの詳細な水平・鉛直構造を把握することができた。従来の亜熱帯海域での観測実績に加え、亜寒帯の海水特性を有する黒潮の北側での観測と、黒潮の横断にも成功したことで、水中グライダーにより実施可能な観測の幅を広げることができた。
- ・水中グライダーによる黒潮横断観測の準備として、水中グライダーの制御用ソフトウェアを更新し、水中グライダーの現在位置における海流の流向に対して右手 90 度の方角に航行する新しい機能を活用することに成功した。流向に対する航行角度は自由に設定することが可能であり、海流を利用したより効率的・機動的な観測が可能になった。
- ・令和 4 年 2 月に日本海で表層海水中の全アルカリ度及び溶存酸素の航走連続観測を行った。溶存酸素の航走観測は初の試みだったが、CTD 観測点における採水分析との差は概ね $\pm 1 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 以内と高い正確度で溶存酸素を連続的に取得できた。日本海北部の低水温域では表面の溶存酸素が大気に対して不飽和となっており、中深層までの強い鉛直対流を裏付けることができた。

②データ解析による海洋物質循環の変動機構解明

- ・ 気象庁の海洋観測データの解析を基に、北太平洋の亜熱帯域に分布する亜熱帯モード水の物理成分および生物地球化学成分が、黒潮続流の流路安定性の変動に対応して亜熱帯モード水の分布域全体で十年規模変動していることを示した。さらに、これらの変動が、亜熱帯モード水の形成域と考えられている黒潮続流周辺海域の表層における塩分および全炭酸濃度の年々～十年規模変動とよく一致することも確認され、北太平洋亜熱帯モード水の形成域と分布域との物理・生物地球化学的なつながりが明らかとなった。
- ・ 東経 165 度観測線における表面海水 DIC のトレンドを算出したところ、大気 CO₂ 濃度増加から想定されるトレンドと概ね一致することが確認されたが、相違点として、西部亜寒帯循環域及び北緯 10 度付近で、大気 CO₂ の増加より遅いこと、黒潮続流で高いことが確認された。これらの要因として海洋循環の変化との関係性を考察し、その内容について論文を発表した (Ono et al., 2023)。
- ・ 南西諸島周辺における 1995～2019 年の pCO₂ データを用いて、当該海域における CO₂ 変動を自然変動と人為起源 CO₂ 増加による変動に細分化した。この変動傾向を RCP4.5 シナリオと RCP8.5 シナリオ下において予測される大気中 CO₂ 濃度や水温に適用して、2100 年までの海洋酸性化予測を行った。
- ・ 熱帯太平洋の海面において、現在エルニーニョ発生時には二酸化炭素放出は減少し、ラニーニャ発生時は増加している。CMIP6 の最も高温化する社会経済シナリオ (SSP5-8.5) に基づく予測において、MRI-ESM2 を含む半分の地球システムモデルで現在にみられるエルニーニョ現象と二酸化炭素放出の関係が逆転していたが、これらのモデルでは、逆転がおきないモデルと比較して、現在の炭酸イオン濃度が正のバイアスを持つ特徴があるため、将来の相関関係の反転は実際には生じにくいと考えられる。MRI-ESM2 においてもバイアスの改善が必要であることが判明した。
- ・ Global Carbon Project の主要事業である Global Carbon Budget 2022 に海洋生物地球化学モデルによる過去再現結果を供出することにより貢献を行った。マルチモデル平均及び観測に基づく過去十年の CO₂ 吸収量見積りに依然乖離がみられた。改良版 MRI-ESM2 の海面 CO₂ 分圧は、不確実性の大きい南大洋を除いては、他の海洋モデルと比較して遜色のない結果を示していた。

(2) 当初計画からの変更点 (研究手法の変更点等)

(副課題 1) 当初計画からの変更はない。

(副課題 2) 当初計画からの変更はない。

(副課題 3) 気象庁の観測体制の見直し及び観測技術の進展や、より成果が見込まれる内容に注力するため、計画を一部変更している。

- ・ 与那国や南鳥島の新規観測 (O₂、CO₂ 同位体、N₂O) の取りやめ。
- ・ 次世代観測技術の開発に、レーザー分光計以外にローコストセンサーを追加。
- ・ 炭素収支解析については、CO₂ だけではなくメタンや酸素も対象にした。
メタンについては濃度だけではなく同位体比も解析に導入した。

(副課題 4) 当初計画からの変更はない。

(3) 成果の他の研究への波及状況

(全体)

- ・ 「日本の気候変動2020」や気候変動監視レポートなど、気象庁による情報発信の内容の改善に貢献している。また、WMO、IPCC、WCRPなどの国際的な報告書やプロジェクトの推進に貢献している。
- ・ 地球システムモデルや気候予測モデルなどの検証や解析を通して、それらの数値モデルの向上に貢献した。
- ・ 地球温暖化に関する最先端の科学的知見の提供及び啓発活動によって、温暖化対策に対する一般市民の意識向上に役立てるとともに、気候変動の緩和・適応に向けた国内外の政策の立案や実施に貢献している。

(副課題 1) 異常気象のメカニズム解明と季節予測可能性の評価

- ・ 季節予測可能性の研究は、気候情報課の季節予報業務と密接に結びついており、気象庁が発表する

季節予報や、予測可能性の要因の理解を通じて発表予報の精度や解説の的確性の向上に貢献した。また、アジアモンスーンと台風の予測可能性研究は、季節予測システムの解析等を通じて、要因のさらなる理解を深め、新たな情報発信に通じる知見が得られた。

- ・異常気象の研究については、気候情報課の異常気象情報センターの監視・解析班の業務と密接に結びついており、蓄積される知見は、異常気象分析検討会の基礎資料となった。
- ・イベント・アトリビューション（温暖化寄与評価）研究は、将来の異常気象の発生頻度と強度、発生要因を理解する上で重要な情報を提供した。また、地球温暖化の影響を数値化することで、国民が地球温暖化の影響を実感するきっかけとなり、国が打ち出す緩和策に対する理解の促進となった。
- ・気候研究の基盤となる長期再解析データの整備については、次期長期再解析 JRA-3Q の作成を数値予報課地球システムモデル技術開発室気候データ同化チームと共同で実施した。このデータは、気候情報課で行っている季節予報の初期値として使用されており、解析業務の基盤情報となる。長期再解析データは、気象コミュニティーにおける気候研究基盤データとして、世界的に広く利用されることが期待される。また、再生可能エネルギーの潜在量の推定など、気象分野外での利活用も期待される。

（副課題2）地球温暖化予測の不確定性低減

- ・大気海洋相互作用を表現する温暖化予測システムによる数値実験・データ解析を通じて 100～150 年程度の過去再現、今世紀半ばまで及び今世紀末までの将来予測情報を提供することにより、将来気候への適応や気候緩和を進める研究や政策に貢献している。特に、複雑な海洋構造を持つ海洋に接した日本域・東アジア域の気候について、海洋を含む詳細かつ高精度の気候情報の提供による社会貢献が可能としている。
- ・地球システムモデルによる十年規模変動予測の利活用を通じて季節予測システム等の本庁現業システムの改良のための知見や判断材料を提供する。加えて、大規模火山噴火による十年規模の影響も調査し、気象庁への貢献をはかっている。
- ・CMIP6 実験のデータや CMIP マルチモデル等の解析による、気候変動メカニズムの要因解明を通じて、地球温暖化予測の不確定性低減に向けた国内外の研究開発活動に貢献した。

（副課題3）次世代海洋データ同化・大気海洋結合データ同化に関する研究

- ・本研究で開発した測定技術や品質管理と解析等の手法は、気象庁における現業観測の効率化や高精度化及び温室効果ガス監視情報の充実に貢献している。
- ・観測技術の高度化と科学的知見の集積は世界気象機関/全球大気監視（WMO/GAW）計画に貢献する。データの標準化及び解析手法の開発は、温室効果ガス世界資料センター（WDCGG）が担う広域の温室効果ガス分布監視情報の向上につながる。温室効果ガス測定の基準となる標準ガススケールの維持・管理は気象庁が運営する世界気象機関全球大気監視校正センター（WMO/GAW-WCC）活動を支える技術的基盤となる。また、国内の地球観測連携拠点の活動に貢献している。
- ・アジア地域における温室効果ガスの発生・吸収源に関する観測に基づいた有効な知見を提供し、地球システムモデルの検証・改良に資することで地球温暖化予測の不確実性低減に貢献する。これらの科学的知見は、IPCC報告書等に反映させ、温室効果ガス排出削減に向けた国際的な地球環境政策に貢献している。
- ・地球温暖化の原因となる温室効果ガスに関する最先端の科学的知見による啓発活動によって、温暖化対策に対する一般市民の意識向上に役立っている。
- ・日本域の温室効果ガス濃度の変動の把握と変動過程の理解は、地球温暖化の将来予測及び排出量削減対策の効果検証の高度化に寄与している。

（副課題4）海洋の生物地球化学循環と酸性化実態の解明

- ・地球システムモデルの海洋生物地球化学過程の精度向上に向けて、C 課題ではモデル相互比較プロジェクトに積極的に参加して、気象研究所の地球システムモデルの海洋物質循環過程で改善すべき点を明らかにし、M 課題と連携して改善に取り組む等の連携強化を図っている。
- ・水中グライダー観測においては、黒潮を横断するなどの機動性実証観測を実施するなど、今後台風中心付近の航空観測と、直下の水中グライダーによる海洋観測の連携等を視野に入れた観測技術の開発を実施している。

今後の研究の進め方

(副課題 1) 異常気象のメカニズム解明と季節予測可能性の評価

- ・アジアモンスーンと台風の予測可能性評価、異常気象の実態解明と要因に与える大規模場の影響評価、および長期再解析データの品質評価を行い、成果の取りまとめを行う。
- ・令和 6 年度後半に WCRP 再解析国際会議を気象庁と東大の共催で準備が進められており、実施体制が固まり次第、国内実行委員会の実動として協力する。
- ・イベント・アトリビューションをオペレーショナルに実施するためには計算負荷を軽減することが不可欠であり、統計的手法も取り入れた新しいイベント・アトリビューション手法を開発する。また、気温や水蒸気だけでなく循環場に対する影響を評価できる発展的な手法を模索する。

(副課題 2) 地球温暖化予測の不確定性低減

- ・CMIP マルチモデルを含む地球システムモデルや高解像度気候予測システム等の結果をもとに気候メカニズムの解明を進めるとともに、全球及び地域スケールの気候の再現・予測の不確実性を評価・低減する研究を進め、成果の取りまとめを行う。
- ・引き続き温暖化予測システム、アンサンブルの将来実験で用いる海水面温度・海氷密接度等の強制データの開発・改良を継続し、地球温暖化のメカニズム解明や、不確実性を含むより有益な地球温暖化情報の作成を進める。

(副課題 3) 大気中温室効果ガスの変動要因・炭素収支の解明

- ・多成分・高分解能データベース、標準ガス調製システム、ハロカーボン測定の確立、清浄大気データの選別手法の確立、温室効果ガス濃度の変動の要因解明と炭素収支評価に関するこれまでの研究に関して、成果の取りまとめを行う。

(副課題 4) 海洋の生物地球化学循環と酸性化実態の解明

- ・これまでの研究を踏まえ、水中グライダー観測の有効性の実証、取得したデータの処理や校正の方法の確立、日本周辺海域における海洋表層炭酸系データ充実化の実証、北西太平洋域における炭酸系パラメータの季節変動・経年変動の実態、北太平洋域及び全球において海洋炭酸系に生じている長期変化傾向や将来変化に関する成果の取りまとめを行う。

研究成果リスト

(1) 査読論文：41 件

1. Komatsu, K., Y. Takaya, T. Toyoda, and H. Hasumi, 2023: A submonthly scale causal relation between snow cover and surface air temperature on the autumnal Eurasian continent. *Journal of Climate*. (submitted)
2. Ono, H., K. Toyama, K. Enyo, Y. Iida, D. Sasano, S. Nakaoka, and M. Ishii, 2023: Meridional Variability in Multi-decadal Trends of Dissolved Inorganic Carbon in Surface Seawater of the Western North Pacific along the 165° E Line. *Journal of Geophysical Research Oceans*. (in press)
3. Whaley, C. H., Law, K. S., Hjorth, J. L., Skov, H., Arnold, S. R., Langner, J., Pernov, J. B., Bergeron, G., Bourgeois, I., Christensen, J. H., Chien, R.-Y., Deushi, M., Oshima, N. et al., 2023: Arctic tropospheric ozone: assessment of current knowledge and model performance. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **23**, 637-661.
4. Takano, Y., et al., 2023: Simulations of Ocean Deoxygenation in the Historical Era: Insights from Forced and Coupled Models. *Frontiers in Marine Science*. (submitted)
5. Terao, T., et al., 2022: AsiaPEX: Challenges and Prospects in Asian Precipitation Research,. *Bulletin of the American Meteorological Society*. (in press)
6. Lauvset, S. K., N. Lange, T. Tanhua, H. C. Bittig, A. Olsen, A. Kozyr, S. Alin, M. Álvarez, K. Azetsu-Scott, L. Barbero, S. Becker, P. J. Brown, B. R. Carter, L. Cotrim da Cunha, R. A. Feely, M. Hoppema, M. P. Humphreys, M. Ishii, et al., 2022: GLODAPv2.2022: the latest version of the global interior ocean biogeochemical data product. *Earth System Science Data*, **14**, 5543-5572.

7. Mukougawa, H., S. Noguchi, Y. Kuroda, and R. Mizuta, 2022: On the Existence of the Predictability Barrier in the Wintertime Stratospheric Polar Vortex: Intercomparison of Two Stratospheric Sudden Warmings in 2009 and 2010 Winters. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **100**, 965–978.
8. Gregory, J. M., J. S. Bloch-Johnson, M. P. Couldrey, E. Exarchou, S. M. Griffies, T. Kuhlbrodt, E. Newsom, O. A. Saenko, T. Suzuki, Q. Wu, S. Urakawa, and L. Zanna, 2022: A new conceptual model of global ocean heat uptake. *Climate Dynamics*. (submitted)
9. Friedlingstein, P., M. O’Sullivan, M. W. Jones, H. Tsujino, et al., 2022: Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data*, **14**, 4811–4900.
10. Kuroda, Y. and H. Mukougawa, 2022: On the origin of the solar cycle modulation of the winter North Atlantic Oscillation. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, **127**, e2022JD036859. (in press)
11. Iizuka, Y., Uemura, R., Matsui, H., Oshima, N., Kawakami, K., Hattori, S., Ohno, H., and Matoba, S., 2022: High Flux of Small Sulfate Aerosols During the 1970s Reconstructed From the SE-Dome Ice Core in Greenland. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, **127**, e2022JD036880.
12. Takemura, K., Y. Nakae, Y. Fujihara, H. Sato, H. Sato, A. Goto, and H. Naoe, 2022: Contribution of anomalous circulation to the early onset of Baiu in western Japan in 2021. *SOLA*, **18S**, 21–26.
13. Andrews, T., A. Bodas-Salcedo, J. M. Gregory, Y. Dong, K. C. Armour, D. Paynter, P. Lin, A. Modak, T. Mauritsen, J. N. S. Cole, B. Medeiros, J. J. Benedict, H. Douville, R. Roehrig, T. Koshiro, H. Kawai, T. Ogura, J.-L. Dufresne, R. P. Allan, and C. Liu, 2022: On the effect of historical SST patterns on radiative feedback. *Geophysical Research Letters*, **127**, e2022JD036675.
14. Xue, Y., I. Diallo, A. A. Boone, T. Yao, Y. Zhang, et al., 2022: Spring Land Temperature in Tibetan Plateau and Global-Scale Summer Precipitation - Initialization and Improved Prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*.
15. Ushijima, Y., H. Tsujino, K. Sakamoto, M. Ishii, T. Koshiro, N. Oshima, 2022: Effects of Anthropogenic Forcings on Multidecadal Variability of the Sea Level Around the Japanese Coast Simulated by MRI-ESM2.0 for CMIP6. *Geophysical Research Letters*, **49**, e2022GL099987.
16. Yukimoto, S., N. Oshima, H. Kawai, M. Deushi, and T. Aizawa, 2022: Role of Interhemispheric Heat Transport and Global Atmospheric Cooling in Multidecadal Trends of Northern Hemisphere Precipitation. *Geophysical Research Letters*, **49**.
17. Morgenstern, O., D. E. Kinnison, M. Mills, M. Michou, L. W. Horowitz, P. Lin, M. Deushi, K. Yoshida, F. M. O’Connor, Y. Tang, N. L. Abraham, J. Keeble, F. Dennison, E. Rozanov, T. Egorova, T. Sukhodolov, G. Zeng, 2022: Comparison of Arctic and Antarctic stratospheric climates in chemistry versus no-chemistry climate models. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, **127**, e2022JD037123.
18. Brown, F., G. A. Folberth, S. Sitch, S. Bauer, M. Bauters, P. Boeckx, A. W. Cheesman, M. Deushi, I. D. Santos, C. Galy-Lacaux, J. Haywood, J. Keeble, L. M. Mercado, F. M. O’Connor, N. Oshima et al., 2022: The ozone-climate penalty over South America and Africa by 2100. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **22**, 12331–12352.
19. Oshima, N., 2022: Benefits and Disbenefits Caused by Aerosols in the Climate System. *エアロゾル研究*, **37**, 189–200.
20. Yosuke Niwa, Kentaro Ishijima, Akihiko Ito, Yosuke Iida, 2022: Toward a long-term atmospheric CO₂ inversion for elucidating natural carbon fluxes: technical notes of NISMN-CO₂ v2021.1. *Progress in Earth and Planetary Science*, **9**, 42.
21. Maki, T., T. Y. Tanaka, T. Koshiro, A. Shimizu, T. T. Sekiyama, M. Kajino, Y. Kurosaki, T. Okuro, and N. Oshima, 2022: Changes in Dust Emissions in the Gobi Desert due to Global Warming Using MRI-ESM2.0. *SOLA*, **18**, 218–224.

22. Zeng G., O. Morgenstern, J.H.T. Williams, F.M. O' Connor, P.T. Griffiths, J. Keeble, M. Deushi, L.W. Horowitz, V. Naik, L.K. Emmons, N.L. Abraham, A.T. Archibald, S.E. Bauer, B. Hassler, M. Michou, M.J. Mills, L.T. Murray, N. Oshima, L.T. Sentman et al., 2022: Attribution of stratospheric and tropospheric ozone changes between 1850 and 2014 in CMIP6 models. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, **127**, e2022JD036452.
23. Tomoaki OSE, Hirokazu ENDO, Yuhei TAKAYA, Shuhei MAEDA and Toshiyuki NAKAEGAWA, 2022: Robust and Uncertain Pressure Patterns over Summertime East Asia in CMIP6 Multi-Model Future Projections. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **100**, 631-645.
24. Matsui, H., Mori, T., Ohata, S., Moteki, N., Oshima, N., Goto-Azuma, K., Koike, M., and Kondo, Y, 2022: Contrasting source contributions of Arctic black carbon to atmospheric concentrations, deposition flux, and atmospheric and snow radiative effects. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **22**, 8989-9009.
25. Vaithinada Ayar, B., L. Bopp, J. R. Christian, T. Ilyina, J. P. Krasting, R. Seferian, H. Tsujino, M. Watanabe, A. Yool, J. Tjiputra, 2022: Contrasting projections of the ENSO-driven CO2 flux variability in the equatorial Pacific under high-warming scenario. *Earth System Dynamics*, **13**, 1097-1118.
26. Zhangxian Ouyang, Andrew Collins, Yun Li, Di Qi, Kevin R. Arrigo, Yanpei Zhuang, Shigeto Nishino, Matthew P. Humphreys, Naohiro Kosugi, Akihiko Murata, David L. Kirchman, Liqi Chen, Jianfang Chen, Wei-Jun Cai, 2022: Seasonal water mass evolution and non-Redfield dynamics enhance CO2 uptake in the Chukchi Sea. *Journal of Geophysical Research Oceans*, **127**, e2021JC018326. (in press)
27. Koshiro, T., H. Kawai, and A. T. Noda, 2022: Estimated cloud-top entrainment index explains positive low-cloud-cover feedback. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United State of America*, **119**, e2200635119.
28. Mizuta, R., M. Nosaka, T. Nakaegawa, H. Endo, S. Kusunoki, A. Murata, and I. Takayabu, 2022: Extreme precipitation in 150-year continuous simulations by 20-km and 60-km atmospheric general circulation models with dynamical downscaling over Japan by a 20-km regional climate model. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **100**, 523-532.
29. Konsta, D., J.-L. Dufresne, H. Chepfer, J. Vial, T. Koshiro, H. Kawai, A. Bodas-Salcedo, R. Roehrig, M. Watanabe, and T. Ogura, 2022: Low-level marine tropical clouds in six CMIP6 models are too few, too bright but also too compact and too homogeneous. *Geophysical Research Letters*, **49**, e2021GL097593.
30. Kushi Kudo, Sakae Toyoda, Keita Yamada, NaohiroYoshida. Daisuke Sasano. Naohiro Kosugi. Akihiko Murata, Hiroshi Uchida, Shigeto Nishino, 2022: Source analysis of dissolved methane in Chukchi Sea and Bering Strait during summer-autumn of 2012 and 2013. *Marine Chemistry*, **243**, 104119.
31. Whaley, C. H., Mahmood, R., von Salzen, K., Winter, B., Eckhardt, S., Arnold, S., Beagley, S., Becagli, S., Chien, R.-Y., Christensen, J., Damani, S. M., Dong, X., Eleftheriadis, K., Evangeliou, N., Faluvegi, G., Flanner, M., (略), Oshima, N., et al., 2022: Model evaluation of short-lived climate forcers for the Arctic Monitoring and Assessment Programme: a multi-species. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **22**, 5775-5828.
32. Komatsu, K., Y. Takaya, T. Toyoda, and H. Hasumi, 2022: Response of Eurasian Temperature to Barents-Kara Sea Ice: Evaluation by Multi-Model Seasonal Prediction. *Geophysical Research Letters*.
33. 松井仁志, 大畑 祥, 當房 豊, 松木 篤, 板橋秀一, 大島 長, 鈴木健太郎, 佐藤陽祐, 2023: 大気化学の将来構想 2022-2032: 各論第2集 7. エアロゾル・放射・雲「エアロゾル-放射・雲相互作用」. *大気化学研究*, **48**, 048A01.
34. 行本誠史, 2022: 気象研究所における気候モデルの歩み. *天気 (論文・短報)*, **69**, 299-317.
35. Alifu, H., Y. Hirabayashi, Y. Imada, and H. Shiogama, 2022: Enhancement of river flooding due to global warming. *Scientific Reports*, **12**, 20687.

- 36 Ito, R., H. Kawase, and Y. Imada, 2022: Regional differences in summertime extremely high temperature in Japan due to global warming. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **61**, 1573-1587.
- 37 Kawase H., S. Watanabe, and Y. Imada, 2022: Impacts of historical atmospheric and oceanic warming on heavy snowfall in December 2020 in Japan. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*. (submitted)
- 38 Kawase, H., M. Nosaka, S. I. Watanabe, K. Yamamoto, T. Shimura, H. Okachi, T. Hoshino, R. Ito, S. Sugimoto, C. Suzuki, Y. Naka, Y.-H. Wu, S. Fukui, Y. Ishikawa, E. Nakakita, N. Mori, T. Takemi, T. Nakaegawa, A. Murata, T. J. Yamada, and I. Takayabu, 2022: Identifying robust changes of extreme precipitation in Japan from large ensemble 5-km-grid regional experiments for 4K warming scenario. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*. (submitted)
39. von Salzen, K., Whaley, C. H., Anenberg, S. C., Dingenen, R. V., Klimont, Z., Flanner, M. G., Mahmood, R., Arnold, S. R., Beagley, S., Chien, R.-Y., Christensen, J., Eckhardt, S., Ekman, A. M. L., Oshima, N. et al., 2022: Clean air policies are key for successfully mitigating Arctic warming. *Communications Earth & Environment*, **3**, 222.
40. Hassan, T., R. J. Allen, W. Liu, S. Shim, T. van Noije, P. Le Sager, N. Oshima, M. Deushi, C. A. Randles and F. M. O' Connor, 2022: Air quality improvements are projected to weaken the Atlantic Meridional Overturning Circulation through radiative forcing effects. *Communications Earth & Environment*, **3**, 149.
41. Adachi, K., N. Oshima, N. Takegawa, N. Moteki, M. Koike, 2022: Meteoritic materials within sulfate aerosol particles in the troposphere are detected with transmission electron microscopy. *Communications Earth & Environment*, **3**, 134.

(2) 査読論文以外の著作物（翻訳、著書、解説等）：13 件

1. Takaya, Y., H.-L. Ren, F. Vitart, A. W. Robertson, 2022: Current status and progress in the seasonal prediction of the Asian summer monsoon. *MAUSAM*. (submitted)
2. Yoden, S., and K. Yoshida, 2023: Impacts of Solar Activity Variations on Climate. In: Kusano, K. (eds) *Solar-Terrestrial Environmental Prediction*, 445-459.
3. Takaya, Y., L.-P. Caron, et al., 2022: Seasonal Tropical Cyclone Forecasting. *WMO 10th International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-10) Report*.
4. Deushi, M., 2022: Climate Impacts: Impacts of ozone on Southern Hemisphere climate. *Handbook of Air Quality and Climate Change*.
5. Kawai, H., T. Koshiro, and S. Yukimoto, 2022: Cloud feedbacks in MRI-ESM2. *CAS/JSC WGENE Research Activities in Earth System Modelling*, **52**, 707-708.
6. 小林ちあき, 石川一郎, 2022: 季節予報モデルで予測された北半球中緯度の高温偏差. *気象研究ノート* 第 **246** 号, 246, 73-79.
7. 鬼頭昭雄, 2022: IPCC 概要. *水文・水資源ハンドブック* 第二版, 539-544.
8. 相澤拓郎, 大島 長, 2022: 北極の気候変動の謎に挑む. *ArCS II ニュースレター*, **5**, 01-02.
9. 石井正好・森 信人, 2022: 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の開発と気候変動リスク評価研究成果の社会実装—2021 年度岸保・立平賞受賞記念講演—. *天気*, **69**, 413-429.
10. 金谷有剛, 須藤健悟, Prabir Patra, 坂本陽介, 関谷高志, 藤縄 環, 谷本浩志, 江口菜穂, 齋藤尚子, 笠井康子, 出牛 真, 佐藤知紘, 2022: 大気化学の将来構想 2022-2032 : 各論第1集 3. 反応性気体「大気汚染物質群の新たな科学 : 化学理論の更新と排出-気候変動・健康問題の解決へ向けて」. *大気化学研究*, **47**, 047A03.
11. 鬼頭昭雄, 2022: 気候変動分野の科学的知見の蓄積について. *令和4年版国土交通白書*, **10**.
12. Takayabu I., et al, 2022, Climate information relevant for Marine Ecosystems, Fisheries and Aquaculture, IPCC WG1 AR6 sectoral fact sheet.
13. 高薮 出, 2022: *水文・水資源ハンドブック* 第2版: 9.1.2「日本の気候変動研究の動向」, 9.2.1「気候変動による地球規模への影響: 平均的な変化と極端現象」

(3) 学会等発表 : 68 件

1. Oshima, N., M. Deushi, T. Aizawa, and S. Yukimoto, Impacts of Short-lived Climate Forcers on the Arctic Climate by MRI-ESM2.0 and Multi-model Analyses, Seventh International Symposium on Arctic Research (ISAR-7), 2023 年 3 月, 東京都立川市
2. Masao Ishii, H. Ono, N. Kosugi, K. Toyama, H. Tsujino, D. Sasano, K. Enyo, Y. Iida, K. Nemoto, JMA's shipboard monitoring of CO₂ in the ocean and in the atmosphere in the western North Pacific, WMO International Greenhouse Gas Monitoring Symposium, 2023 年 2 月, スイス, ジュネーブ
3. Naoe, H., S. Kobayashi, Y. Kosaka, J. Chiba, T. Y. Tanaka, T. Tokuhito, Y. Harada, C. Kobayashi, Y. Imada, M. Deushi, Representation and Consistency of the Latest Japanese Reanalysis for Three Quarters of a Century (JRA-3Q), AGU Fall Meeting 2022, 2022 年 12 月, 米国, シカゴ&オンライン
4. Takaya, Y. and L. P. Caron, Seasonal Tropical Cyclone Forecasting, WMO 10th International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-10), 2022 年 12 月, インドネシア, デンパサール
5. Takaya, Y., and Y. Fujii, Importance of ocean observations for sub-seasonal to seasonal forecast in East Asia, SynObs キックオフワークショップ, 2022 年 11 月, つくば市
6. Koshiro, T., H. Kawai, and A. T. Noda, Estimated cloud-top entrainment index explains positive low-cloud-cover feedback, 6th WGENE workshop on systematic errors in weather and climate models, 2022 年 11 月, イギリス, レディング
7. Harada, Y., T. Kinoshita, K. Sato, and T. Hirooka, Characteristics of planetary-wave packet propagation during a major sudden stratospheric warming event in January 2021, SPARC 2022 7th General Assembly (GA), 2022 年 10 月, オンライン (ボルダー、レディング、青島)
8. Naoe, H. and K. Shibata, Decadal variations of the quasi-biennial oscillation (QBO) in the equatorial stratosphere, SPARC 2022 7th General Assembly (GA), 2022 年 10 月, オンライン (ボルダー、レディング、青島)
9. Yoshida, K., The polar stratosphere-troposphere coupling variation with El Niño Southern Oscillation and Quasi-Biennial Oscillation in large-ensemble simulations, SPARC 2022 7th General Assembly (GA), 2022 年 10 月, オンライン (ボルダー、レディング、青島)
10. Kobayashi, C., S. Maeda, Seasonal Predictability of the Negative Antarctic Oscillation after the 2019 Southern Hemisphere Stratospheric Sudden Stratospheric Warming, SPARC 2022 7th General Assembly (GA), 2022 年 10 月, オンライン (ボルダー、レディング、青島)
11. Rodgers, K., O. Aumont, K. Toyama, L. Resplandy, M. Ishii, T. Nakano, D. Sasano, R. Yamaguchi, Drivers of low latitude marine primary productivity and export production, 2022 年度日本海洋学会秋季研究発表大会, 2022 年 9 月, 名古屋
12. Koshiro, T., H. Kawai, and A. T. Noda, Estimated cloud-top entrainment index explains positive low-cloud-cover feedback, 16th Conference on Cloud Physics, 2022 年 8 月, アメリカ, マディソン
13. Koshiro, T., H. Kawai, and A. T. Noda, Estimated cloud-top entrainment index explains positive low-cloud-cover feedback, CFMIP Meeting on Clouds, Precipitation, Circulation, and Climate Sensitivity, 2022 年 7 月, アメリカ, シアトル
14. Takaya, Y., A. Minami, S. Iwasaki, Y. Imada, H. Kawase, Flow-dependent forecast skill in S2S time-scales, 2022 ASP workshop, 2022 年 7 月, アメリカ, ボルダー
15. Naoe, H., S. Kobayashi, Y. Kosaka, J. Chiba, T. Tokuhito, Y. Harada, C. Kobayashi, Y. Imada, Evaluation of the latest Japanese Reanalysis for three quarters of a century (JRA-3Q) during a pre-satellite era (part2), JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン

16. 所 立樹, 中岡慎一郎, 高尾信太郎, 野尻幸宏, 斉藤 秀, 笹野大輔, 小杉如央, Statistical analysis of temporal and spatial variations of air-water CO₂ flux in the Kuroshio region, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
17. Kawai, H., T. Koshiro, and S. Yukimoto, How can the double-ITCZ problem be alleviated in climate models?, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
18. Harada, Y., S. Kobayashi, Y. Kosaka, J. Chiba, T. Tokuhito, Evaluation of the JRA-3Q reanalysis using various observational datasets, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
19. 原田やよい, 木下武也, 佐藤 薫, 廣岡俊彦, 2021 年 1 月に発生した北半球大規模突然昇温における惑星規模波束伝播の特徴および成層圏における角運動量収支について, 第 9 回波と平均流の相互作用に関する研究会, 2023 年 2 月, 宮城県仙台市
20. 直江寛明, 対流圏ジェットの季節予測可能性に対する対流圏成層圏結合と中緯度海洋前線帯の役割 (その 1), 新学術領域研究「中緯度大気海洋」(気候系の Hotspot2) 第 4 回領域全体会議, 2022 年 12 月, 宇治
21. 原田やよい, 木下武也, 佐藤 薫, 廣岡俊彦, 2021 年 1 月に発生した北半球大規模突然昇温における
22. 足立恭将, 直江寛明, 久保勇太郎, 小寺邦彦, 中緯度海洋前線の予測への影響評価-冬季の大西洋領域の季節内予測, Hotspot2 領域全体会議ポスターセッション, 2022 年 11 月, オンライン
23. 尾崎智乙, 森本真司, 藤田 遼, 梅澤 拓, Doug Worthy, 後藤大輔, カナダ・チャーチルにおける大気中のメタン濃度とその炭素・水素同位体比の変動, 第 27 回大気化学討論会 (2022), 2022 年 11 月, 茨城県つくば市
24. Ryo Fujita, Heather Graven, Giulia Zazzeri, Benjamin Hmiel, Vasilii V. Petrenko, Andrew M. Smith, Global fossil methane emissions constrained by multi-isotopic atmospheric methane histories, 第 27 回 大気化学討論会 (2022), 2022 年 11 月, 茨城県つくば市
25. Taku UMEZAWA, Toshinobu MACHIDA, Yosuke NIWA, Hidekazu MATSUEDA, Kazuhiro TSUBOI, Kentaro ISHIJIMA, Ryo FUJITA, The CONTRAIL commercial airliner measurements during the ACCLIP campaign, ACCLIP Science Team Meeting, 2022 年 11 月, 米国, コロラド
26. 大島 長, アイスコアと気象研究所地球システムモデルによるエアロゾル沈着量の長期変化, グリーンランド南東ドームアイスコアに関する研究集会, 2022 年 11 月, 北海道函館市
27. 足立恭将, 直江寛明, 久保勇太郎, 小寺邦彦, 中緯度海洋前線の予測への影響評価-2020 年 2 月の大西洋サイクロン事例-, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, オンライン
28. 水田 亮, 牛島悠介, 遠藤洋和, 辻野博之, 吉田康平, 宮坂貴文, 石井正好, 海洋を同化した気候モデルによる, 21 世紀末までの 150 年連続アンサンブル実験, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
29. 黒田友二, 直江寛明, 成層圏変動の冬季極域対流圏気候への影響予測子としての役割, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
30. 竹村和人, 前田修平, 山田 賢, 直江寛明, 向川 均, JMA/MRI-CPS3 における夏季日本付近での碎波頻度の季節予測可能性, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
31. 神代 剛, 川合秀明, 野田 暁, 推定雲頂エントレインメント指標が正の下層雲量フィードバックを説明する, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
32. 行本誠史, 大島 長, 川合秀明, 出牛 真, 相澤拓郎, 北半球降水量の長期変化における半球間熱輸送と全球大気冷却の役割, 気象学会 2022 秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
33. 石戸谷重之, 遠嶋康徳, 菅原 敏, 奈良英樹, 森本真司, 丹羽洋介, 後藤大輔, 石島健太郎, 坪井一寛, 青木伸行, 中岡慎一郎, 亀崎和輝, 豊田 栄, 辻野博之, 村山昌平, 気候変動と炭素・酸素循環の包括的評価を目指した大気主成分と極微量成分の長期広域観測, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
34. 石島健太郎, 町田敏暢, 丹羽洋介, 梅澤 拓, 笹川基樹, 坪井一寛, 澤 庸介, 藤田 遼, 松枝秀和, 眞木貴史, 田中泰宙, 中村 貴, 民間航空機観測により捉えられた米国西部森林火災由来 CO₂ 変動, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市

35. 森本真司, 保田真人, 藤田 遼, 梅澤 拓, 後藤大輔, 青木周司, 西太平洋域及び極域での大気中 CH_4 濃度とその炭素・水素同位体比の変動, 学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 北海道札幌市
36. 藤田 遼, 町田敏暢, 石島健太郎, 丹羽洋介, 梅澤 拓, 坪井一寛, 澤 庸介, 松枝秀和, 笹川基樹, 民間航空機による東京上空の CO_2 濃度の長期観測と国内インベントリ監視への適用, 気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 北海道札幌市
37. 山田 賢, 前田修平, 竹村和人, 直江寛明, JMA/MRI-CPS3 再予報データにおける黒潮・メキシコ湾流の同期現象の再現性と予測精度, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
38. 楠 昌司, 水田 亮, 仲江川敏之, 高解像度全球大気モデルによるパナマの降水量再現性, 日本気象学会 2022 年秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
39. 小林ちあき, 原田やよい, 古林慎哉, 高坂裕貴, 千葉丈太郎, 徳広貴之, 行本誠史, 川合秀明, JRA-3Q の全球平均エネルギーバランス, 日本気象学会 2022 年秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
40. 原田やよい, 釜堀弘隆, 古林慎哉, 高坂裕貴, 千葉丈太郎, 徳廣貴之, JRA-3Q の赤道波・熱帯低気圧の表現性能評価 (第 2 報), 日本気象学会 2022 年秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
41. 柴田清孝, 直江寛明, 成層圏準二年振動 (QB0) の十年規模振幅変動, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
42. 直江寛明, 古林慎哉, 高坂裕貴, 千葉丈太郎, 田中泰宙, 徳広貴之, 原田やよい, 小林ちあき, 今田由紀子, 出牛 真, 気象庁長期再解析 (JRA-3Q) の表現と一貫性について, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
43. 小杉如央, 岡英太郎, 佐藤佳奈子, 定期海洋観測と BGC フロートによって定量された北西太平洋亜熱帯域の純一次生産の比較, 日本海洋学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 9 月, 名古屋市&オンライン
44. 石井雅男, 日本海洋学会賞受賞記念講演「高精度炭酸系観測による海洋炭素循環と酸性化に関する研究」, 日本海洋学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 9 月, 名古屋市
45. 小野 恒, 遠山勝也, 石井雅男, 笹野大輔, 亜熱帯モード水形成域と分布域との物理・生物地球化学的つながり, 日本海洋学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 9 月, 名古屋市&オンライン
46. 川合秀明, 地球の温度上昇予測に大きなばらつきがあるのはなぜか? - 答えは、雲 -, 日本気象学会第 56 回夏季大会, 2022 年 8 月, オンライン
47. 原田やよい, 木下武也, 佐藤 薫, 廣岡俊彦, 2021 年 1 月に発生した北半球大規模突然昇温における惑星規模波束伝播の特徴 (第 2 報), JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
48. 小野 恒, 石井雅男, 笹野大輔, 生物地球化学的変動から見る北太平洋亜熱帯モード水の分布過程, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
49. 小林ちあき, 岩崎俊樹, 再解析で表現される平均子午面循環の強度差の要因 - データ同化システムの全球モデル変更の影響 -, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
50. 原田やよい, 古林慎哉, 高坂裕貴, 千葉丈太郎, 徳廣貴之, 様々な観測データセットを用いた JRA-3Q の品質評価, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
51. 直江寛明, 古林慎哉, 高坂裕貴, 千葉丈太郎, 徳広貴之, 原田やよい, 小林ちあき, 今田由紀子, 気象庁長期再解析 (JRA-3Q) 非衛星時代の品質評価 (その 2), 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
52. 保坂征宏, 気候データ可視化システム CDVoB (仮称) の開発, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
53. Heather Graven, Ryo Fujita, Ralph Keeling, Samar Khatriwala, Joeri Rogelj, Xiaomei Xu, Recent and future trends in atmospheric radiocarbon, Radiocarbon in the Anthropocene, 2022 年 5 月, Whittlebury Park
54. 楠 昌司, 水田 亮, 仲江川敏之, 高分解能全球大気モデルの降水量再現性, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, 東京

- 55 Harada, Y., S. Kobayashi, Y. Kosaka, J. Chiba, T. Tokuhito, Evaluation of the JRA-3Q reanalysis using various observational datasets, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
- 56 Takayabu, I, Handshaking between projection data producers and users, JpGU U-10-1, 2022 年 5 月、千葉県千葉市
- 57 Takayabu, I, WCRP Regional Information for Society, relevance for Southeast Asia and link with CORDEX-SEA, CORDEX-SEA workshop, 2022 年 11 月 8 日, ATENEO De Manila, オンライン
- 58 Takayabu, I, Toward collaboration between climate projection and its utilization, 2022 年 11 月, 東京国際フォーラム (東京都)
- 59 Imada, Y., How to attribute extreme events to climate change using climate model simulations. 健康関連ワークショップ Climate Change and Human Health in Asia: Current Impacts, Future Risks, and Co-benefits, The Univ. of Tokyo, 2022 年 11 月 16 日, 東京都文京区
- 60 高薮 出, 気候予測研究と利活用研究の連携に向けて, 日本気象学会 2022 秋大会, 2022 年 10 月, 北海道札幌市
- 61 高薮 出, IPCC における情報の蒸留, 都立大学第 3 回研究交流会, 2023 年 2 月, 東京都南大沢
- 62 今田由紀子, 近年の気候シミュレーションの技術革新がもたらす ENSO 研究の新展開. 気候形成・変動機構研究連絡会基調講演, 北海道大学, 2022 年 10 月 26 日, 北海道札幌市
- 63 今田由紀子, 小坂 優, 川瀬宏明, 渡部雅浩, 日本に猛暑をもたらす“二段重ね高気圧”と台風の関係. 気象学会 2022 年度秋季大会, 北海道大学, 2022 年 10 月 25 日, 北海道札幌市
- 64 今田由紀子, イベント・アトリビューション〜異常気象に対する地球温暖化の影響を定量化する新手法. 気候非常事態宣言ネットワーク (CEN) 2 周年シンポジウム (テーマ: 気候非常事態宣言からカーボンニュートラル実行プランへ), 丸の内ビル, 2022 年 11 月 17 日, 東京都千代田区.
- 65 今田由紀子, 異常気象が異常でなくなる世界. 第 50 回日本救急医学会総会・学術集会 テーマ 1 「気候変動」, 京王プラザホテル, 2022 年 10 月 19 日, 東京都新宿区.
- 66 今田由紀子, 最新の気候モデルが描き出す地球温暖化と日本の異常気象, 気象学会 2022 年度春季大会 真鍋淑郎先生ノーベル賞受賞記念特別公開シンポジウム, オンライン, 2022 年 5 月 21 日.
- 67 Takayabu, I, Issues to be solved for deliver climate change projection information to users, AGU2022 fall meeting, GC42S, 2022 年 12 月.
- 68 Imada, Y., H. Tsujino, G. Yamanaka, and S. Urakawa, Impact of tropical instability waves on large-scale atmospheric circulation. JpGU2022, Makuhari, Chiba, 2022 年 5 月, オンライン.

(4) 投稿予定論文:

報道・記事

1. 今田由紀子, 高薮 出, 川瀬宏明, 渡部雅浩, 森 信人, 令和 4 年 6 月下旬から 7 月初めの記録的な高温に地球温暖化が与えた影響に関する研究に取り組んでいます. 文部科学省・気象研究所合同報道発表, 2022 年 9 月 6 日.
2. 今田由紀子, イベント・アトリビューションー日本の大雨と台風ー. 報道関係者向けオンラインブリーフィング「気候変動は異常気象にどれくらい影響を及ぼしているのか」イベント・アトリビューション科学と報道, オンライン, 2022 年 10 月 20 日.
3. 今田由紀子, 6 月下旬からの猛暑、温暖化で発生確率 240 倍に気象研などチーム. 毎日新聞, 2022 年 9 月 6 日.
4. 今田由紀子, 今夏の記録的暑さ「温暖化影響」発生確率 240 倍, 気象研究所. 共同通信, 2022 年 9 月 7 日.
5. 今田由紀子, 今夏の猛暑、温暖化で「底上げ」起こりやすさ 240 倍に. 朝日新聞, 2022 年 9 月 6 日.
6. 今田由紀子, 今夏の記録的猛暑、温暖化なければ 1200 年に 1 度の極めてまれな現象. 読売新聞, 2022 年 9 月 15 日.

7. 今田由紀子, 猛暑発生率 温暖化で 240 倍. 毎日新聞, 2022 年 9 月 15 日.
8. 今田由紀子, 猛暑の発生確率は「240 倍」スパコン分析で数値化, 温暖化の脅威が「自分事」に. 東京新聞, 2022 年 9 月 25 日.
9. 今田由紀子, 温暖化解明に挑む科学の力 定量化する手法「E A」とは. 産経新聞, 2022 年 11 月 12 日.
10. 今田由紀子, 異常気象 温暖化どれだけ影響? 朝日新聞, 2022 年 11 月 15 日.
11. 今田由紀子, 渡部雅浩, この異常気象、地球温暖化のせい? 深刻さ数値化、問題を身近に. 毎日新聞デジタル, 2022 年 9 月 6 日.
12. 今田由紀子, 渡部雅浩, 温暖化影響 数値で可視化 異常気象分析 迅速に発表, 毎日新聞, 2022 年 9 月 15 日.

S 地震と津波の監視・予測に関する研究

研究年次：4年目／5年計画（令和元年度～令和5年度）

研究代表者：中村雅基（地震津波研究部長）

課題構成及び研究担当者

（副課題1）地殻活動監視に関する研究

副課題代表者：山本剛靖

〔地震津波研究部〕田中昌之、小林昭夫、露木貴裕、弘瀬冬樹、溜渕功史、野田朱美

（副課題2）地震動即時予測に関する研究

副課題代表者：下山利浩

〔地震津波研究部〕小木曾仁、小寺祐貴

（副課題3）津波予測に関する研究

副課題代表者：林 豊

〔地震津波研究部〕対馬弘晃、南 雅晃

研究協力者：（氏名・機関）

勝間田明男（富山大学）

研究の背景・意義 ※現状、問題点、研究の必要性及び緊急性についても記載

（社会的背景・意義）

地震調査研究推進本部は、「新たな地震調査研究の推進について」（平成21年4月公表、平成24年9月見直し）において、当面10年間に取り組むべき地震調査研究に関する基本目標として、地震動即時予測及び地震動予測の高精度化、津波即時予測技術の開発及び津波予測に関する調査観測の強化等を掲げた。平成30年3月に報告されたレビューでは、期間中の取り組みにおける実績を評価した上で、今後の課題として、微小地震や地殻変動の観測データを用いた中期的な地震発生の評価手法の検討、津波即時予測の迅速性と予測精度の一段の向上等の必要性を挙げている。

また、平成28年（2016年）熊本地震を受けて、それまでの余震確率評価手法を生かしつつ発展させた「大地震後の地震活動の見通しに関する情報のあり方」（平成28年8月）の中では、今後も引き続き、地震活動の見通しに関する情報の改善について検討を継続していくことが述べられている。

文部科学省科学技術・学術審議会測地学分科会は、平成31年度からの5年間に実施する観測研究計画として「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）の推進について」を策定中で、その中では地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測手法の構築、地震動や津波等災害誘因の事前評価・即時予測手法の高度化等に取り組むことが謳われている。

（学術的背景・意義）

平成7年（1995年）兵庫県南部地震以降、基盤的地震観測網の整備が行われて全国均質な地震観測データが蓄積され、近年は震源処理の自動化が進み、リアルタイム的に地震活動の統計的特徴の把握が可能となっている。また、個々の地震活動評価についても、地震予知連絡会の重点検討課題として継続的な検討作業が行われているほか、国際的な枠組みでの手法の提案や評価が進んでいる。

地震動即時予測は、地震被害軽減に向けた新しい手段として世界中で研究が進められている。

この中で、揺れから揺れを予測する考え方を発展させるなど、今後のこの分野のマイルストーンを築く。

東北地方太平洋沖地震による津波が甚大な被害をもたらしたことから、稠密な沖合津波観測網の整備と様々な津波即時予測技術の開発が行われ、津波初期部の即時予測については社会実装の段階に進みつつある。

（気象業務での意義）

国土交通省交通政策審議会気象分科会は「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」（平成30年8月公表）において、地震、津波現象を的確に把握・評価し、実況や経過、見通し等について、わかり易くきめ細かに提供する等の取組を進めるべきとして、地震活動や地殻変動を統合的に解析し現象の推移を的確に評価することで今後の地震活動の見通しについてより具体的に情報

の提供を行うこと、緊急地震速報において面的な揺れの広がりやの予測を提供するとともに震度だけでなく長周期地震動階級も合わせて提供すること、津波の実況や予想に基づき津波の第1波・最大波から減衰までの津波の時間的推移や警報・注意報の解除の見通しを提供することなどを具体的な目標として提言した。気象庁は、これらの目標を実現するために必要な技術開発を進めることが求められている。

気象研究所ではこれまで、従来の緊急地震速報で用いられている“震源とマグニチュードの早期決定”という考え方に加えて“揺れから揺れを予測する”という考え方で研究を進めてきており、その簡易版にあたる PLUM 法は平成 30 年 3 月に緊急地震速報に導入された。地殻活動監視については、規模別頻度分布の係数 b 値や潮汐と地震活動の相関などを調査し、それぞれのパラメータから応力の集中が起きている可能性などを推定することができたほか、地震活動の統計的解析から前震識別の最適パラメータを推定し確率利得の評価など、地震活動の見通しに関する情報の改善に寄与する研究を行ってきている。津波の時間的推移の予測については、津波観測データの解析により数値モデルで表現した時間的推移が地震の規模と相関をもつことを明らかにしてきている。

研究の目的

(全体)

地震の発生に伴う災害を防止・軽減するため、地震活動・地震動・津波の諸現象への理解を深め、地震と津波の監視・予測技術の開発・改良を行う。

(副課題 1)

地震活動の状況把握と推移予測を的確に行うため、地震・地殻変動データの解析に基づいて地殻活動の状況を適切に指標化することによって、地殻活動状態の変化を監視し異常度を評価する手法を開発する。

(副課題 2)

地震動即時予測の有効性を広げるため、地震動即時予測技術の精度向上、迅速化、及び堅牢化を図るとともに、長周期地震動までを含めた様々な周期での地震動即時予測を行えるよう改良する。

(副課題 3)

長時間継続する津波の事前予測や推移予測を行うため、津波伝播計算手法を改良することによって、日本の沿岸域における津波全過程予測精度を改善する。

研究の目標

(全体)

統合的な地殻活動指標を考案し、地殻活動の異常度を表す手段としての可能性を評価する。地震動即時予測の精度、迅速性、及び堅牢性の向上、様々な周期の揺れの予測への拡張、日本の沿岸域における津波全過程予測の精度向上を図る。

(副課題 1)

地震活動の特徴を表す様々な指標と地殻変動の解析結果の地域特性・時間変化の特徴を調査し、さらにそれらの様々な指標を組み合わせた統合的指標を考案する。統合的指標について、顕著地震の発生との関連性の調査や物理的背景の検討などにより、地殻活動の現在の異常度を表現する手段としての可能性を評価する。

(副課題 2)

地震動即時予測について観測震度に対して予測震度が概ね震度差 1 以内に収まる精度を目指す。また、震源位置やマグニチュードが決まっていない段階においても震度予測ができる迅速性・堅牢性の向上も目指す。さらに、長周期(およそ周期 10 秒程度まで)の様々な揺れの予測にも対応できるように拡張・強化する。

(副課題 3)

津波伝播計算における沿岸域での境界条件等を最適化する。それにより、津波伝播計算による日本の沿岸域における第 1 波到達から後続波、減衰に至るまでの津波全過程予測の精度向上を図る。

研究成果

(1) 今年度得られた成果の概要

(全体)

副課題1では、地殻変動の指標化を進め、地震活動指標とともに顕著地震等との関連性を調査した。副課題2では、地震波動の伝播方向や伝播速度の推定手法の開発を行った。副課題3では、津波伝播計算におけるエネルギー散逸、海陸境界での境界条件などの検討を行い、長時間津波伝播計算の改良の方向性を示した。

(副課題1)

- ・地殻変動の指標化として2000年以降のGNSSデータから日本全域の格子化ひずみ速度場を計算し、大きなひずみ速度を示した地域や時期を抽出した結果、東北日本の広範囲における2011年東北地方太平洋沖地震による影響、房総半島や四国西部におけるスロースリップイベントによる影響などと関連付けられることを示した。
- ・自動処理によって得られた2011年3～4月の微小地震カタログを用いてETASモデルによるデクラスタを行い、2011年東北地方太平洋沖地震前後の内陸部での背景地震活動度の変化を検討した結果、背景地震活動度は震央距離200km付近で約4倍、1000km付近では約1.4倍活発化したと定量的に評価できた。
- ・豊後水道における深部微動と潮汐との相関の長期的な時間変化を調査した。長期的スロースリップイベント (LSSE) の隣接領域ではせん断応力による潮汐感度が高く潮汐応力値が大きいほど深部微動が発生しやすく、また、LSSE期とそれ以外の期間の比較では潮汐感度はLSSE期の方が大きいことを示した。

(副課題2)

- ・地震波動の伝播方向や伝播速度を地震動の実況把握に活用するため、アレイ解析手法のひとつである Wave gradiometry の利用を検討している。合成波形を用いた予備解析の結果、観測点が多数存在する関東地方では長周期地震動の伝播方向や伝播速度が即時的に推定できる可能性があることがわかった。
- ・また、単独観測点の地震波形から地震波動の伝播方向の観測情報を得るため、深層学習による波動伝播方向推定手法の開発を進めた。P 波検測をせずに波形形状から直接伝播方向を推定する本手法は、連続して地震が発生するケースでも適用可能であることを示した。
- ・地震波伝播シミュレーションに基づいた地震動即時予測の応用として、地震波の逆伝播を用いた震度分布の事後推定手法の開発を進めている。逆伝播時にも観測地震動を同化することにより、観測値が得られなかった領域でもある程度地震動分布が復元できる見通しが得られた。
- ・長周期地震動の予測では、短周期地震動の予測（震度の予測）で取り入れられている PLUM 法のような手法による長周期地震動の即時予測の可能性について、検討を進めた。

(副課題3)

- ・遠地津波の振幅の増加・減衰過程を近似する関数の導出に用いられていない期間・海域の歴史津波のうち、1780 年のウルフ島沖の地震による北海道への遠地津波の典拠を確認したところ、北海道に津波が及んだというデータは誤りであることが判明した。
- ・2016 年の福島県沖の地震津波について、長時間津波伝播計算を行い、近地の沿岸での津波減衰過程の再現度を調べた。その結果、再現度は地点ごとに異なること、観測値と計算値の差は波源推定誤差の影響を上回り、沿岸域パラメータ等の伝播過程の表現方法に改善の余地があることを示した。
- ・2016 年の福島県沖の地震において小名浜の検潮所で観測された津波第一波の波形に着目し、津波伝播計算におけるエネルギー散逸について調べた。その結果、津波伝播過程における非線形性の1つである移流の計算で生じる数値散逸が、現実の物理散逸の代替を担い、観測波形の再現に寄与している可能性があることを示した。
- ・津波伝播計算における津波減衰過程の精度向上のため、海陸境界での境界条件の改良を行い、既存の方法での計算との比較を行った。これにより計算格子間隔より小さい現象も津波減衰過程の計算結果の精度に影響を与えていることを示した。
- ・津波伝播計算を安定に行える条件について検討した。その結果、積分時間間隔を CFL 条件を満たす範囲で一般的に用いられる値よりも長くしても安定して計算が可能であり、その方法によって計算速度の向上が可能であることを示した。

- ・2022年のフンガ・トンガーフンガ・ハアパイ火山の噴火に伴う水位変動について、日本の沖合水圧計観測網の観測データにアレイ解析手法のひとつである Wave gradiometry を適用し、海洋波伝播の面的分布を推定した。これにより、日本近海では、海洋波は南東から北西へ向かって概ね津波の速さで伝播していたことを観測データから明らかにした。
- ・2022年のフンガ・トンガーフンガ・ハアパイ火山の噴火に伴う水位変動について、日本の沖合水圧計観測網の観測データを用いて、火山カルデラの空間スケールを持つ固体地球現象に伴う津波の規模を概算したところ、初期水位の体積にして3 km³程度であり、日本へ到来した津波全体に占める割合としては大きくないことを示した。

(2) 当初計画からの変更点（研究手法の変更点等）

なし

(3) 成果の他の研究への波及状況

地震動即時予測に関し、米国版緊急地震速報（ShakeAlert）への PLUM 法導入を検討するため、米国地質調査所（USGS）が主体となり米国西海岸にて PLUM 法の実証実験が行われている。

(4) 事前・中間評価の結果の研究への反映状況

事前評価（平成30年11月）では、地震津波研究部のもう一つの研究課題（課題N）との相互関係や位置付けが不明瞭であるなどの指摘を受けたため、それぞれの課題の対象を整理し直し、計画の修正を行った。なお、本シートではこの修正後の計画を当初計画として記述している。

中間評価（令和3年9月）では「修正の必要なし」との評価であった。

今後の研究の進め方

来年度は研究計画の最終年度にあたることから、以下の項目を進めた上で研究の取りまとめを行う。

(副課題1)

地殻活動の特徴を表す様々な指標を組み合わせた統合的指標について、顕著地震の発生との関連性の調査や物理的背景の検討などにより、地殻活動の現在の異常度を表現する手段としての性能評価を行う。

(副課題2)

データ同化手法を用いて波動場を正確に推定し、そこから長周期地震動を含め未来の波動場を予測する手法を発展させ、地震動波形の予測モデルの構築を進める。また、現業への導入を考慮し、実時間よりも早く計算が行えるよう計算方法の改良を図る。

(副課題3)

津波伝播計算の安定性・再現性に影響を与える沿岸域での摩擦・境界条件などの要素に着目し、計算手法を改良し長時間予測の精度向上を図る。これにより、観測事例が知られていない現象を含めた津波全過程予測手法を改良する。

研究成果リスト

(1) 査読論文：3件

1. Ogiso, M., and H. Tsushima, 2023: Ocean-wave Gradiometry: Visualizing and Extracting Propagation Features of the 15 January 2022 Tsunami Wavefield with Dense Ocean-Bottom Pressure Gauge Arrays. *Seismological Research Letters*.
2. Nagata, K., K. Tamaribuchi, F. Hirose, and A. Noda, 2022: Statistical study on the regional characteristics of seismic activity in and around Japan: frequency-magnitude distribution and tidal correlation. *Earth, Planets and Space*, **74**, 179.
3. Saunders, J. K., S.E. Minson, A.S. Baltay, J. J. Bunn, E. S. Cochran, D. L. Kilb, C. T. O' Rourke, M. Hoshiba and Y. Kodera, 2022: Real-Time Earthquake Detection and Alerting Behavior of PLUM Ground-Motion-Based Early Warning in the United State. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **112** (5), 2668-2688.

(2) 査読論文以外の著作物(翻訳、著書、解説等) : 3件

1. 気象庁気象研究所, 2022: 内陸部の地震空白域における地殻変動連続観測. *地震予知連絡会会報*, **108**, 442-445.
2. 田中昌之, 2022: 中規模繰り返し相似地震の発生状況と発生確率 (2022). *地震予知連絡会会報*, **108**, 608-612.
3. 対馬弘晃, 2022: 沖合の津波観測による近地津波の即時予測ー津波波源推定とデータ同化を中心にしてー. *月刊地球*, **515**, 381-388.

(3) 学会等発表 : 11 件

ア. 口頭発表 : 11 件

・国際的な会議・学会等 :
なし。

・国内の会議・学会等 : 11 件

1. 小寺祐貴, 深層学習による単独観測点からの波動伝播方向推定の試み, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「地震動をはじめとする地球科学データの即時解析・即時予測と情報の利活用」, 2023 年 1 月, 東京都文京区
2. 小木曾仁, Wave gradiometry を用いた波動伝播の即時把握に向けた検討, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「地震動をはじめとする地球科学データの即時解析・即時予測・情報の利活用」, 2023 年 1 月, 東京都文京区
3. 下山利浩, 長周期地震動の即時予測についての検討, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「地震動をはじめとする地球科学データの即時解析・即時予測・情報の利活用」, 2023 年 1 月, 東京都文京区
4. 南 雅晃, 津波数値計算における詳細な CFL 条件～その計算精度・速度の検討, 第 12 回巨大津波災害に関する合同研究集会, 2022 年 12 月, 大阪府大阪市
5. 対馬弘晃, 2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の津波数値解析: 沿岸部における非線形性の影響評価, 第 12 回巨大津波災害に関する合同研究集会, 2022 年 12 月, 大阪府大阪市
6. 小木曾仁, 対馬弘晃, 海洋波のグラディオメトリ解析: 稠密海底圧力観測網データを用いた津波波動場の可視化と伝播特徴の抽出, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「陸海両域での超高密度観測時代の観測・解析手法と地震波伝播理論の新展開」, 2022 年 12 月, 東京都文京区
7. 小木曾仁, 地震波伝播の即時把握へ向けた Wave gradiometry の活用可能性の検討, 日本地震工学会・大会ー2022, 2022 年 12 月, 札幌市
8. 下山利浩, 長周期地震動の予測についての検討, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 北海道札幌市
9. 野田朱美, 測地データと地震データを用い 3 次元モーメント密度分布のインバージョン解析, 震源インバージョンワークショップ～地震発生物理の包括的理解に向けた手法開発とその実践～, 2022 年 7 月, 文京区
10. 対馬弘晃, 林 豊, 山本剛靖, 稠密海底水圧観測が津波の波源・伝播の再現に与える効果: 2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の事例解析, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市 & オンライン
11. 小木曾 仁, 地震動エネルギーの逆伝播を用いた最大震度分布の事後推定, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン

イ. ポスター発表：15 件

・国際的な会議・学会等：3 件

1. Kodera, Y., Automatic classification of fast and slow earthquake signals from continuous records using an unsupervised machine learning algorithm, International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2022, 2022 年 9 月, 奈良
2. Tsushima, H., Capability of Inversion of Dense Offshore Tsunami Measurements to Constrain Spatio-Temporal Evolution of Tsunami Source Generation, AGU Fall Meeting 2022, 2022 年 12 月, 米国, シカゴ&オンライン
3. Kodera, Y., Unsupervised Automatic Classification of Fast and Slow Earthquake Signals from Continuous Records with a Hierarchical Clustering Algorithm, AGU Fall Meeting 2022, 2022 年 12 月, 米国, シカゴ&オンライン

・国内の会議・学会等：12 件

1. Ogiso, M., Estimation of source radiation amplitude from seismic coda waves considering the heterogeneous seismic structure, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
2. 林 豊, 1780 年ウルップ島地震による日本での津波のデータの信頼性, 日本地球惑星科学連合 2022 年大会, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
3. 高野洋雄, 対馬弘晃, 林 豊, Entel Mikhail, トンガ火山噴火に伴う潮位振動について, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
4. 対馬弘晃, 林 豊, 海底水圧記録を用いた 2022 年トンガ火山噴火に関連した初期水位体積の概算, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
5. 鎌谷紀子, 小木曾 仁, 自己回帰モデルによるスペクトル解析ー地盤増幅率の周波数特性評価への適用ー, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
6. 小木曾 仁, J-SHIS 地盤データを用いた計測震度に対するサイト特性係数の検討, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
7. 永田広平, 溜渕功史, 弘瀬冬樹, 野田朱美, 統合的な地殻活動指標の構築に向けてー“ふつう”の地震活動の特徴に基づく異常度評価ー, JpGU meeting 2022, 2022 年 6 月, 千葉県千葉市&オンライン
8. 木村久夫, 小林昭夫, 山本剛靖, 露木貴裕, 地殻変動データの指標化に向けた試行, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 北海道札幌市
9. 対馬弘晃, 稠密沖合津波波形の逆解析による津波波源生成の時空間発展の拘束, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 北海道札幌市
10. 小木曾 仁, 不均質な地下構造の影響を考慮した地震波エンベロープを利用した震源放射エネルギーの推定, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 北海道札幌市
11. 小寺祐貴, 深層学習を用いた地震波形からの波動伝播方向推定の試み, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 北海道札幌市
12. 弘瀬冬樹, 小林昭夫, 前田憲二, 長期的スロースリップイベント時に上昇する豊後水道の深部微動の潮汐相関, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 北海道札幌市

N 南海トラフ地震の地震像とスロースリップの即時把握に関する研究

研究年次：2年目／5年計画（令和3年度～令和7年度）

研究代表者：中村雅基（地震津波研究部長）

研究担当者：

小林昭夫、田中昌之、露木貴裕、西宮隆仁、弘瀬冬樹、木村久夫、溜渕功史、野田朱美

研究協力者：【氏名（機関）】

勝間田明男（富山大学）、馬場久紀（東海大学）

研究の動機・背景

（社会的背景・意義）

地震調査研究推進本部は、平成25年に「南海トラフの地震活動の長期評価」の改訂版（第二版）を公表し、その中で次の南海トラフの大地震の規模をM8～9クラスとし、今後30年の発生確率を60～70%と推定した（令和2年時点では70～80%）。昭和53年には南海トラフ地震の一部である東海地震を念頭に、「大規模地震対策特別措置法」が制定され、地震の予知がされた場合の対策が制度化された。しかし、中央防災会議が平成29年9月にとりまとめた「南海トラフ沿いの地震観測・評価に基づく防災対策のあり方について（報告）」では、確度の高い地震の予測は現在の科学的知見では難しいことが指摘され、新たな防災対応が定められるまでの当面の対応として、平成29年11月から気象庁が「南海トラフ地震に関連する情報」の発表を開始するなど、不確実ではあるものの、大規模地震発生の可能性が平常時と比べて相対的に高まっていると評価された際の防災対応へと方向性が大きく変わってきた。

内閣府が令和元年5月に一部改訂した「南海トラフ地震の多様な発生形態に備えた防災対応検討ガイドライン【第1版】」では、大規模地震の発生可能性が相対的に高まったと判断できるケースとして、「半割れケース」「一部割れケース」「ゆっくりすべり（スロースリップ）ケース」の3通りをあげ、それぞれのケースに対する防災対応を検討している。気象庁では、これらのケースが発生した場合、有識者からなる「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」を開催し、その評価結果に基づき「南海トラフ地震臨時情報（巨大地震警戒や巨大地震注意）」を発表し、一定期間警戒や注意を呼び掛け、その後も引き続き、地震活動や地殻変動の状況について「南海トラフ地震関連解説情報」を適宜発表することとした。これらの評価検討や情報発表のためには、発生した地震の地震像や余震活動、スロースリップの即時解析技術が必要となる。

（学術的背景・意義）

20年ほど前から、全国の陸域に高密度のGNSSや高感度地震計が展開され、南海トラフ沿いでは深部低周波微動・地震を伴うプレート境界の短期的スロースリップ、長期的スロースリップなどが観測され、それらの検知能力が向上してきた。一方、南海トラフの海域では、10年ほど前から地震・津波観測監視システム（DONET）が運用開始され、固着域浅部で発生する低周波微動や超低周波地震が報告されているが、常時監視には至っていない。

2016年4月に発生した紀伊半島沖の地震について、破壊領域に関する各機関の解析結果が一致せず、見解の一致をみるまで時間がかかるという事態が発生した。この原因は、海域における観測点の不足と海域の地震波速度構造の把握が不十分なことによる。1946年南海地震の破壊開始点付近の地震について、プレート境界の地震か否かを即時に判断できないという事実は、地震関係者に重く受け止められた。

10年ほど前から、光ファイバーケーブルを用いた振動計測DAS（Distributed Acoustic Sensing；分散型音響センシング）技術がパイプライン監視などセキュリティ分野で実用化されている。これは光ケーブルに光パルスを入射し、後方散乱光を観測するもので、長さ40から70kmまで、数メートルおきの場所の振動を計測できる。2、3年前からはDASを地震観測へ適用する試みも報告され始めている。地震観測へのDASの活用が可能になれば、点から線への観測となり、既存の海底光ケーブルの活用も期待され、海域における地震監視の強化につながる可能性がある。

(気象業務での意義)

気象庁からの「南海トラフ地震臨時情報」発表のきっかけとなる「半割れケース」「一部割れケース」「ゆっくりすべり（スロースリップ）ケース」が発生した場合、大規模地震発生の可能性が平常時と比べて相対的に高まっていると判断するためには、発生した地震の地震像やスロースリップの規模、広がり、時間発展などについての確に把握する必要がある。また、これらの現象発生後、大規模地震発生に至るまでの時間経過が不明なため、できる限り早く臨時情報を発表することが望ましく、解析の即時性も重要となる。このため、発生した地震の地震像を即時把握する技術の向上、大地震後の余効変動に隠れた新たなスロースリップをはじめ、各種スロースリップの把握精度向上は、「南海トラフ地震臨時情報」発表の迅速化、情報発表につながるスロースリップの監視強化のために不可欠な研究である。

また、気象庁からの要望の一つとして、南海トラフ付近での地震やスロースリップ発生がその後の巨大地震に結び付くか否かの予測がある。一つの方法として数値シミュレーションがあり、今後数年では信頼できる予測は困難ではあるものの、中長期的にモデルの改善を継続する必要がある。

研究の目的

本研究では、南海トラフでの「半割れケース」「一部割れケース」「ゆっくりすべり（スロースリップ）ケース」の3通りのケースに対応し、気象庁が行う解析に貢献し、地震像を即時把握することで「南海トラフ地震臨時情報」の確実な早期発表と、情報発表につながるスロースリップの監視強化に寄与することを目的とする。

研究の目標

発生した地震の規模、破壊領域など地震像を即時把握する手法を改善するとともに、把握精度を向上させる。また、多様なスロースリップの監視技術開発、把握精度向上を図る。さらに、地震観測活用のための光ファイバ振動計の検証、現在観測されているより小規模な現象を再現できるよう地震発生の数値モデルの改善を行う。

研究成果

(1) 今年度得られた成果の概要

- ・船明トンネルにて年間を通じて温度がほぼ一定である状況下で DAS の試験観測を行い、自然地震を観測した。DAS は周辺の自然地震を多数、センサ部の光ファイバ上に設定した各位置で捉えており、同じ自然地震でも位置により特に振幅に違いが見られた。光ファイバの敷設状態はどこでも同じではなく、地面とのカップリングが要因の一つとして考えられる。また、振幅の再現性調査のため小型の加振器を使い、周波数を固定して発振の大きさを段階的に変えた振動を、DAS（ひずみ速度）と地震計（速度）の両方で同時に観測した。加振器で振らせた振動の大きさを変化させた場合、DAS と地震計ともに振幅は線形傾向だった。しかし、加振器で振らせる振動の周波数と大きさを一定にして長時間観測させると、地震計の振幅は定常であるのに対して DAS の振幅は一定ではなく、その変化は時間的に規則性が見られなかった。
- ・紀伊半島沖で過去に発生した地震について気象庁観測点など近地の地震波で震源過程解析を行う場合に、例えば東北地方太平洋沖の地震に比べると構造の不均質の影響が大きいため解析が難しいこと、3次元速度構造を取り入れることで妥当な結果が得られる可能性があることを確認した。
- ・自動震源決定に関し、従来手法を用いて地震波を検出し深層学習（CNN）を用いて P/S/ノイズ判定することで、従来よりも約8割の誤決定が抑制されることを確認した。2011年3月から1年間の長期間にわたる地震波形に適用し、従来の地震カタログ（32万個）の約2倍に相当する61万個の微小地震活動を新たに検出できることを確認した。
- ・即時に自動震源決定を行うため、複数の観測網を統合的に処理する震源推定手法の開発を行い、事例検証を行った。気象庁で常時稼働させるため、ソースを提供した。
- ・東海大学と共同で、駿河湾における海底地震計観測を行った。また、過去10年間の駿河湾の海底地震計のデータに微動が記録されていないか調査したが微動は認められなかった。
- ・DONET 観測点を用いた浅部低周波微動のモニタリングシステムを常時稼働させ、微動検出時には評価検討会等で報告した。本システムを気象庁で常時稼働させるため、ソースを提供した。

- ・大地震発生後の余効変動の逐次推定・除去処理を開発した。この手法を日向灘の GNSS 客観検知に適用し、1996 年日向灘の地震に伴う余効変動が除去され、日向灘南部の 1998～2001 年の長期的スロースリップが検出されることを確認した。その長期的スロースリップのすべりの中心は宮崎・鹿児島県境沖にあり、すべりの規模は Mw 6.7 相当であった。また、南海トラフおよび日向灘の客観検知ツールを EPOS に移植した。
- ・地殻変動データのジョイントインバージョンによるすべり分布推定ツールを EPOS に移植した。
- ・地震発生シミュレーションについて、長期的・短期的スロースリップ (LSSE, SSSE) を再現するため細かなメッシュの平面断層モデルを用いて各種パラメータに対するモデルの挙動を検証した。昭和東南海地震時の東海沖の割れ残りを想定して地震発生層 (アスペリティ) のパラメータを東西で変え、その深部に LSSE と SSSE に対応するパッチを置いた。その結果、M8 クラスの地震 (西側アスペリティの破壊 2 回と全域破壊 1 回を繰り返す) 間に 10 年間隔で M6 クラスの LSSE、2 か月間隔で M5 クラスの SSSE が現れ、各現象の発生間隔や規模を概ね再現できた。なお、LSSE は全域破壊後には現れないが、SSSE は定常的に発生した。

(2) 当初計画からの変更点 (研究手法の変更点等)

特になし

(3) 成果の他の研究への波及状況

特になし

(4) 事前・中間評価の結果の研究への反映状況

事前評価の総合評価は「修正の必要なし」だった。

今後の研究の進め方

当初計画通りに研究を進める。具体的な計画は以下の通り。

- ・光海底ケーブルを用いた DAS の観測を行う。自然地震やエアガン等による振動の検出と特徴抽出、蓄積データから振幅情報の再現性を調査する。
- ・南海トラフ沿いのプレート境界に震源域を固定しつつ 3 次元構造を考慮して、近地地震波形を用いて南海トラフ地震の適切な解が得られる震源過程解析手法を開発する。
- ・東海大学と共同で海域の地震観測を行う。
- ・AI 技術を用いた地震波形データの識別処理の開発を行い、自動震源決定処理の比較検証を行う。
- ・浅部超低周波地震の検出手法の開発を行う。
- ・ひずみ計、GNSS などの地殻変動データを同時に使った短期的、長期的スロースリップの変動源推定手法を検証する。
- ・大地震発生後の余効変動の逐次推定・除去処理を改良する。
- ・地震発生シミュレーションについて計算速度高速化を行い、従来の結果と比較検証を行う。

研究成果リスト

(1) 査読論文: 4 件

1. Hirose, F., K. Maeda, K. Fujita, and A. Kobayashi, 2022: Simulation of great earthquakes along the Nankai Trough: reproduction of event history, slip areas of the Showa Tonankai and Nankai earthquakes, heterogeneous slip-deficit rates, and long-term slow slip events. *Earth, Planets and Space*, **74**, 131.
2. Saito, T., and A. Noda, 2022: Mechanically Coupled Areas on the Plate Interface in the Nankai Trough, Japan and a Possible Seismic and Aseismic Rupture Scenario for Megathrust Earthquakes. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, **127**, e2022JB023992.
3. Tamaribuchi, K., M. Ogiso, and A. Noda, 2022: Spatiotemporal distribution of shallow tremors along the Nankai Trough, Southwest Japan, as determined from waveform amplitudes and cross-correlations. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, **127**, e2022JB024403.
4. 工藤祥太, 下條賢梧, 溜瀧功史, 2023: 1 次元畳み込みニューラルネットワークを用いた地震波形検測. *験震時報 (論文)*. (in press)

(2) 査読論文以外の著作物（翻訳、著書、解説等）：4 件

1. 野田朱美, 2023: 力学的カップリングに基づくプレート境界大地震のシナリオ作成手法の開発. *Slow-to-Fast 地震学ニュースレター*, 2. (submitted)
2. 野田朱美, 2023: 南海トラフで将来発生するのはどんな地震?—プレート境界における地震シナリオ作成手法の開発—. *日本地震学会広報誌「なるふる」*, **132**. (in press)
3. 気象研究所, 2022: 南海トラフ沿いの長期的スロースリップの客観検知. *地震予知連絡会会報*, **108**, 439-441.
4. 気象研究所, 2022: 全国 GNSS 観測点のプレート沈み込み方向の位置変化. *地震予知連絡会会報*, **108**, 24-28.

(3) 学会等発表：21 件

ア. 口頭発表：12 件

・国際的な会議・学会等：1 件

1. Noda, A., and T. Saito, Energy-based scenarios for Nankai trough earthquakes: The impacts of aseismic slip events on strain energy accumulation, International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2022, 2022 年 9 月, 奈良

・国内の会議・学会等：11 件

1. 永井あすか, 馬場久紀, 笠谷貴史, 横山由香, 中尾風佐, 佐柳敬造, 大上隆史, 西宮隆仁, 坂本 泉, 阿部信太郎, 篠原雅尚, Exploration of Turbidity Current occurred in northern Suruga Bay by Typhoon No. 24 in 2018. -Traces Turbidity Current survey by R/V Shinsei Maru KS-21-1 Cruise-, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市 & オンライン
2. Noda, A., and T. Saito, Energy-based scenarios for interplate great earthquakes taking aseismic slips outside seismogenic zone into account, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
3. 溜瀧功史, 工藤祥太, 下條賢梧, 機械学習を実装した自動震源決定システムの開発, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「地震動をはじめとする地球科学データの即時解析・即時予測・情報利活用」, 2023 年 1 月, 東京都文京区
4. 永井あすか, 西宮隆仁, 中尾風佐, 馬場久紀, 長尾年恭, 駿河湾の海底地震計で観測される波形の種類について—巨大地震震源域での低周波微動検出の試み—, 日本地震予知学会 2022 年度学術講演会, 2022 年 12 月, 京都府京都市
5. 野田朱美, 齊藤竜彦, プレート境界の力学的カップリングの推定: 相模トラフ沿いプレート境界で発生する大地震の多様性, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 北海道札幌市
6. 中川茂樹, 青山 裕, 高橋浩晃, 前田拓人, 内田直希, 山本 希, 大竹和生, 鶴岡 弘, 青木陽介, 前田裕太, 大見士朗, 中道治久, 大久保慎人, 松島 健, 八木原寛, 汐見勝彦, 植平賢司, 上田英樹, 宮岡一樹, 溜瀧功史, 本多 亮, 関根秀太郎, マルチプラットフォーム次世代 WIN システムの開発 (2), 日本地震学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 北海道札幌市
7. 溜瀧功史, 工藤祥太, 2011 年東北地方太平洋沖地震後の未カタログイベントの検出, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 北海道札幌市
8. 西宮隆仁, 永井あすか, 中尾風佐, 馬場久紀, 小林昭夫, 溜瀧功史, 駿河湾における OBS 観測の概要と観測記録への微動検出手法適用の試み, 2022 年度 第 1 回「南海トラフ～南西諸島海溝の地震・津波に関する研究会」, 2022 年 10 月, 東京都千代田区
9. 平松祐一, 田中愛幸, 小林昭夫, スロースリップ信号の検出に向けた石垣島地方気象台における連続重力データの解析 (第二報), 日本測地学会第 138 回講演会, 2022 年 10 月, 鹿児島 (ハイブリッド)

10. 溜渕功史, 深層学習による地震波検測の検討, 第41回若手地震工学研究者の会セミナー, 2022年9月, 長崎県長崎市
11. 西宮隆仁, 3次元構造を反映した地震波の Green 関数を用いた震源過程解析の試み, JpGU meeting 2022, 2022年5月, 千葉県千葉市&オンライン

イ. ポスター発表: 9件

・国際的な会議・学会等: 1件

1. Noda, A., and T. Saito, An Inversion Method to Estimate Mechanically Coupled Areas on the Plate Interface, AGU Fall Meeting 2022, 2022年12月, 米国, シカゴ&オンライン

・国内の会議・学会等: 8件

1. Panayotopoulos, Y., S. Abe, H. Baba, N. Nakao and T. Nishimiya, Report from 5 years Ocean Bottom Seismometer observations in Suruga Bay, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, 2022年10月, 北海道札幌市
2. 平松 祐一, 田中 愛幸, 小林 昭夫, Preliminary analysis of continuous gravity measurement data obtained at a long-term slow slip area in the Ryukyu Trench, JpGU meeting 2022, 2022年6月, 千葉県千葉市&オンライン
3. 勝間田明男, 島 淳元, 西宮隆仁, 能登半島で発生している群発地震について, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, 2022年10月, 北海道札幌市
4. 田中昌之, 小林昭夫, DAS で捉えた人工振動の振幅について, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, 2022年10月, 北海道札幌市
5. 西宮隆仁, 3次元構造を反映した地震波の Green 関数を用いた 2004 年紀伊半島沖の地震 (MJ7.1) の震源過程解析, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, 2022年10月, 北海道札幌市
6. 小林昭夫, 木村一洋, 発生した地震の余効変動を除去した GNSS 非定常変位の検出, JpGU meeting 2022, 2022年6月, 千葉県千葉市&オンライン
7. 勝間田明男, 西宮隆仁, 速度構造の震源決定位置への影響について(4), JpGU meeting 2022, 2022年6月, 千葉県千葉市&オンライン
8. 溜渕功史, 深層学習による地震波検測の検討: 2011 年東北地方太平洋沖地震前後への適用, JpGU meeting 2022, 2022年5月, 千葉県千葉市&オンライン

(4) 投稿予定論文:

なし。

報道・記事

- ・野田朱美、関東大震災から 100 年～次の関東地震に備える (仮題)、海洋研究開発機構広報誌 Blue Earth (2023 年 3 月刊行予定)

その他 (4. (3) 「成果の他の研究への波及状況」関連)

(業務化事項)

- ・南海トラフの浅部低周波微動検出時に評価検討会等に資料を提出した。
- ・南海トラフおよび日向灘の客観検知ツールを EPOS に移植した。
- ・地殻変動データのジョイントインバージョンによるすべり分布推定ツールを EPOS に移植した。

V 火山活動の監視・予測に関する研究

研究年次：4年目／5年計画（令和元年度～令和5年度）

研究代表者：吉田康宏（火山研究部長）

課題構成及び研究担当者

（副課題1）地殻変動観測等に基づく火山活動評価

副課題代表者：鬼澤真也（第一研究室長）

〔火山監視課〕安藤 忍、森 健彦、奥山 哲、岡田 純、川口亮平、島村哲也、入山 宙、
菅井 明、小久保一哉、

〔地震火山技術・調査課〕山田晋也

〔地震津波研究部〕小林昭夫

（副課題2）化学的手法等による火山活動監視

副課題代表者：高木朗充（第三研究室長）

〔火山監視課〕谷口無我、堀口桂香、森 健彦、飯野英樹、手操佳子、百合本 岳、工藤直樹

〔地震火山技術・調査課〕松本 享

〔気象予報研究部〕橋本明弘

（副課題3）火山噴出物の監視技術とデータ同化に基づく輸送予測

副課題代表者：新堀敏基（第二研究室長）

〔火山監視課〕佐藤英一、石井憲介、入山 宙、林 洋介、西條 祥

〔気象予報研究部〕橋本明弘

研究協力者：【氏名（機関）】

福井敬一（客員研究員）

研究の動機・背景 ※現状、問題点、研究の必要性及び緊急性についても記載

（社会的背景・意義）

日本ではこれまでたびたび火山噴火が発生し国民の生命や暮らしが脅かされており、火山との共生は国家的な課題である。国として火山災害の軽減を目指す火山噴火予知研究への取り組みは、1974年度の「火山噴火予知計画」（測地学審議会建議）に始まり、2014年度からは「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」（科学技術・学術審議会建議）に基づいて実施されてきた。

2014年9月の御嶽山噴火による戦後最悪の火山災害を受けて、火山噴火予知連絡会では「御嶽山の噴火災害を踏まえた活火山の観測体制の強化に関する報告」（2015年3月）をとりまとめた。その中で気象庁には、「これまでに発生した事象の経験や学術研究の成果を最大限活用した火山活動の評価体制の強化」が求められ、また「過去の水蒸気噴火において、先行現象として地磁気変化や火山ガス成分の変化が観測されている。気象庁は大学・研究機関等と連携して、これらの観測データを長期間安定して蓄積しつつ、水蒸気噴火を繰り返してきた火山の噴火の兆候をより早期に把握するための技術の習得及び開発を行う」とされている。

その後、2016年には火山防災への貢献を目指して文部科学省の「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト」（10か年）が創設されているが、2018年1月の草津白根山（本白根山）の噴火では、またしても人的被害が発生している。

気象庁では、各火山で実施する観測に基づいて火山活動の評価を行い、噴火予報及び警報の発表、「噴火警戒レベル」の運用を行っている。これらは、国民の安全・安心に寄与するものであり、最近の火山災害に鑑みてなお一層その的確な運用の基礎となる火山活動評価の精度向上は重要な課題となっている。

さらに、火山噴火に伴う噴煙や風の影響を受けて降下する小さな噴石（火山礫）、火山灰といった火山噴出物は広範囲に災害をもたらす。1707 年富士山宝永噴火や 1914 年桜島大正噴火のような大規模噴火を想定して試行したシミュレーションでは、時季によって国内どこでも浮遊火山灰や降灰の可能性があることが推定されている。大規模降灰時は、交通や電力等インフラへの影響による社会的混乱が懸念され、すみやかに除灰などの対策が取れない場合の経済的被害は計り知れない。

2013 年 5 月に出された「大規模火山災害対策への提言」では「大規模な降灰対策」について、「国及び大学等の監視観測・調査研究機関は、的確な予警報の発表や適切な防災対応のために、大規模な降灰の発生、拡散を早い段階で予知・予測する手法や、降雨時においても降灰状況を把握することができるレーダー解析の手法等の調査研究・技術開発に努めるべきである」と提言され、2018 年 8 月末には「大規模噴火時の広域降灰対策検討ワーキンググループ」が中央防災会議防災対策実行会議の下に設置されたところである。

浮遊火山灰や降灰対策を立てる上でも、火山噴火時に火山噴出物の即時的な輸送予測の技術を確立するための研究開発は、継続的に取り組む必要のある課題である。

（学術的背景・意義）

我が国では、2000 年有珠山噴火などいくつかの事例で、前もって噴火の発生を予測することに成功しているが、2014 年の御嶽山の噴火では、活動の変化を把握しながら噴火の前兆と評価することができず、さらに 2018 年の草津白根山の噴火では、常時監視の対象とは別の火口で噴火が発生するなど、火山活動の評価と予測に関して未解決の課題が少なくない。

顕著な火山噴火は低頻度の自然現象であるため、火山の研究においては火山現象の観測とその事例解析およびモデル化が、今でも欠かすことのできない研究手段である。また、観測データをより高精度に解析するための技術開発が、研究および業務、双方において必要である。

伊豆大島は 30 数年の間隔で周期的に噴火する火山であり、前回の噴火が 1986 年であったことから近い将来に噴火する可能性が高いとみられている。気象研究所が、これまで伊豆大島で行ってきた観測研究から、短期的な収縮・膨張という特徴的な現象や、長期的な膨張が球状圧力源で期待されるものよりも東西方向に卓越することなど、マグマ供給系解明の端緒を開く成果が得られている。しかし、噴火準備過程の全容や噴火に至るプロセスを明らかにするためには、GNSS 解析や SAR 干渉解析での補正の精度を向上させて地殻変動をより詳細に把握すること、地下の物理モデルの構築で欠かせない熱や水などの収支を観測から評価して準備過程の全容を表現する物理モデル構築を目指すことが必要である。

近年 GNSS や ALOS-2 を始めとする衛星 SAR の解析技術の向上によって、箱根山や霧島山でみられたような微小な火山性地殻変動をとらえることができるようになり、地下数 km の深さにおけるマグマの蓄積や、数百 m の浅部の局所的な熱水等の活動も検出できるようになってきた。ただし、大気の影響でみかけの地殻変動がみられることもあり、解析をより精密に行うためには対流圏遅延補正の改良に引き続き取り組む必要がある。

蓄積したマグマや熱水が移動、上昇して噴火に至ることを事前に予測することは大きな課題である。それら火山性流体の内部で生じる物性の変化等と、その動きを妨げる周囲の地殻の構造の変化により、発生する地震活動や地殻変動も多様に変化しうると考えられる。地下の物性の分布や変化をとらえる手法として、地震学の分野で近年発展している背景雑音を用いる手法は、この課題へのアプローチとして取り組む価値が高いと考えられる。

火山ガスはその中に含まれる成分ごとにマグマへの溶解度が異なることなどから、噴火の前には火山ガスの組成比が変化することがあると考えられており、これまでにいくつかの事例も報告されている。しかし、火山ガス成分の高精度で高頻度の観測の事例が少ないことや、単純な説明が適用できないことも多いことから、火山ガスの組成分析に基づく火山活動評価の研究は、地球物理学的手法等による研究と比べると進展していなかった。火山活動における火山ガスの寄与の全体像は明らかにされておらず、また明確なモデル化もされていない。

一方で、マグマが直接移動せず活発な地震活動や地殻変動を生じない水蒸気噴火などの解明において、火山ガスは有望な観測項目のひとつと考えられており、火山ガスの直接採取による高精度分析と、火山ガスのセンサーによる高頻度観測をバランスよく行う観測研究は、火山ガスを活動評価に活用する上で有望視されている。

さらに火山噴火の際に、降灰の状況を正確かつ即時的に把握・予測し、推定される降灰の範囲や程度に応じてすみやかに対応をとることは、被害を最小限に抑えるために重要である。

火山灰の輸送や火山礫の降下範囲の予測には、初期値として噴煙高度が用いられている。現状の噴煙高度は、遠望カメラ等を用いた目視観測によって得られているが、火山の山頂部周辺に雲がかかっている場合や規模の大きな噴煙の場合は、目視観測では噴煙高度が把握できず、正確な予測が困難になっている。噴煙の高度や量を観測する手段として気象レーダーの有効性が注目されており、過去5か年の研究では、2014年御嶽山、2017～18年霧島山（新燃岳）、2018年草津白根山（本白根山）噴火で噴煙の範囲や高度、およびそれらの時間変化を明らかにしてきた。また、Kuバンド高速スキャンレーダーによる噴煙の3次元構造変化の約1分毎に取得（世界初）や、Xバンド二重偏波レーダーによる噴煙内部の火山噴出物の状態変化の捕捉にも成功している。しかし、現在のレーダー観測技術では、噴煙と雨雲の判別、噴煙中の火山灰・礫の総量や分布等の即時的かつ定量的な把握などは実現していない。レーダー観測や気象衛星観測を活用して、火山噴火時に正確な降灰量分布の予測や、正確な降礫範囲の予測をするためには、研究開発を継続する必要がある。

火山噴出物の移流拡散予測について、これまで降灰・降礫を対象とした領域移流拡散モデルと浮遊火山灰を対象とした全球移流拡散モデルの開発および火山灰データ同化システム（プロトタイプ）の作成を行ってきた。しかしながら、領域移流拡散モデルは海拔約20km以下の下部成層圏までの噴煙しか予測できないため、大規模噴火時に想定される上部成層圏まで達するような強い噴煙にも対応するには、全球移流拡散モデルによる降灰・降礫予測が必要である。また初期値に用いている噴煙供給源モデルには、弱い噴煙における風の影響や強い噴煙に伴う傘型噴煙が入っていないため、噴煙観測に基づく火山灰データ同化による修正が課題である。このため、全球／領域の二つのモデルを統一して、降灰・降礫から浮遊火山灰まで一貫して扱える新しい移流拡散モデルの開発が必要である。その上で、火山灰データ同化システムと結合して初期値改善を図るとともに、火山灰の凝集や再飛散などの物理過程の導入と合わせて、予測精度向上を図ることができる。

（気象業務での意義）

気象庁は、国の行政機関として信頼できる火山情報を一元的に広く提供する責務を負っており、地殻変動観測等による火山活動評価が、震動観測等による火山活動のモニタリングと並んで、火山監視業務の技術的な柱となっている。特に地殻変動観測は、地下のマグマや熱水等の蓄積を圧力源モデルとして検出できる火山監視に有効な手法のひとつであるため、GNSSや傾斜計等による地殻変動の監視が行われている。これらのデータについて、火山監視への高度な利用を図り、適切な火山活動評価に活用する手法を開発・改良することは、火山監視業務への大きな貢献である。

気象庁では平成27年度から順次4火山（御嶽山、吾妻山、草津白根山、九重山）に多成分火山ガス連続観測装置を設置して観測を開始したが、観測データの品質管理や評価手法について課題を多く抱えている。これらの課題解決に向けた協力が、気象庁からの行政要望にあげられている。

気象庁が目指す火山ガス観測による火山活動評価を実現するためには、現地で直接採取した火山ガスを精緻に分析し、火山活動評価にどのように活用しうのかなどを研究する必要がある、その研究成果は気象庁火山監視業務に直接貢献する。

気象庁で行っている降灰予報（速報・詳細）は現在、目視観測による噴煙高度に依存しているため、噴煙高度の観測ができないときには正確な降灰予報が困難となる。目視観測を補う噴煙の観測手法の確立が急務である。

また予測対象に降礫を含む降灰予報（速報）では、予測計算の高速化が求められている。高速化によりリアルタイムで計算実行できるようになれば、想定外の火口からの噴火や噴火後すぐに降り始める火山灰や火山礫へも対応が可能になる。

さらに航空路火山灰情報については、現在は火山灰が浮遊する範囲のみの情報であるが、合わせて火山灰の濃度に関する確率的予測を提供しようという動きが国際航空路火山監視のためのロードマップにある。新たに開発する移流拡散モデル、さらにはその初期値となる供給源モデルを高度化した火山灰データ同化・予測システムの構築は、このような課題にも対応する。

研究の目的

(全体)

火山活動への理解を深め、火山現象の評価・予測の精度を高めることにより、気象庁火山業務における噴火警報、噴火警戒レベル、降灰予報、航空路火山灰情報などの改善に資する。

(副課題1) 地殻変動観測等に基づく火山活動評価

火山内部の状態把握をよりの確に行えるよう地殻変動データなどの解析手法の開発・改善を進め、噴火に至るプロセス等の解明を行うことにより、火山活動評価手法の改善を図る。

(副課題2) 化学的手法等による火山活動監視

化学的手法等による観測・分析によって火山ガス活動の理解を深め、火山噴火の前兆を早期に把握する監視手法を開発し、火山活動予測への活用を図る。

(副課題3) 火山噴出物の監視技術とデータ同化に基づく輸送予測

噴火現象の即時的な観測技術および予測技術の開発・改良を行うことにより、大規模噴火にも対処可能な「降灰予報」および「航空路火山灰情報」とその精度向上を図る。

研究の目標

(全体)

地殻変動や火山ガスなどの観測データの解析をととして、火山活動の理解を深めるとともに、火山内部の状態をよりの確に把握することで、火山活動予測、火山活動評価の改善を図る。また、噴火に伴う浮遊火山灰や降灰等、噴火現象の即時的な把握技術および予測技術の開発を行う。

(副課題1) 地殻変動観測等に基づく火山活動評価

- [テーマ1] 伊豆大島で地殻変動源解析によりマグマ蓄積量を迅速に把握し、多項目観測を統合したプロダクトと精密に補正した重力観測データを用いて、マグマ上昇の検出・モニタリングを行う。地表面熱・水収支、およびマグマ・揮発性成分収支のモデルを構築し、火山活動評価への活用を図る。他の活動的火山でも活動評価に資する地殻変動等の解析を行う。
- [テーマ2] 衛星 SAR 解析における大気遅延補正を気象モデルを用いて高精度化し、GNSS 解析にも気象モデルを導入して、火山における地殻変動検知能力を向上させる。また、火山活動の理解を深めるために、地殻変動から地下の変動源の時空間変化を推定する手法、及び地下のマグマ挙動に伴う地殻変動のシミュレーション手法を開発し、それらの事例解析の比較により解析手法と物理モデルを改良する。
- [テーマ3] 伊豆大島の震動観測データに地震波干渉法を適用して、地下の速度構造の時間変化の要因を評価することにより、火山活動に伴う速度構造変化を検出する手法を開発する。

(副課題2) 化学的手法等による火山活動監視

- [テーマ1] 直接採取による火山ガスや火山灰および熱水の化学分析や安定同位体比の分析研究を進めることで、火山ガス活動の理解を深め、個々の火山における火山ガス活動の機構の解明を目指す。
- [テーマ2] 火山ガスの放出率や組成比をモニタリング・評価する技術を開発する。テーマ1による火山ガス活動への理解をふまえ、副課題1の地殻変動などの物理観測データも組み合わせた多項目解析を行うことで、火山活動評価への活用を図る。

(副課題3) 火山噴出物の監視技術とデータ同化に基づく輸送予測

- [テーマ1] 気象レーダー等の観測データを用いて、噴火現象の検知や噴煙に含まれる火山灰等の定量的推定手法を開発する。
- [テーマ2] 浮遊火山灰や降灰等を統一的に予測するための新しい移流拡散モデルを開発・改良する。さらに火山灰データ同化システム（プロトタイプ）と結合させることにより、気象レーダー等による観測値と移流拡散モデルの予測値に基づく火山灰データ同化・予測システムを構築する。

研究成果

(1) 今年度得られた成果の概要

(全体)

- ・伊豆大島で実施している、GNSS・光波測距等による地殻変動観測、重力の精密観測、UAV を用いた空中熱赤外観測等の総合的な観測及びそれらのデータを用いた解析を継続した。数値気象モデルを用いた干渉 SAR や GNSS データの補正手法の開発及び山体地形を考慮して地殻変動源を求める手法の開発を行った。地震波干渉法により得られた速度変化に関して、諸観測量との関係性について調査した。
- ・霧島山（硫黄山）、箱根山、草津白根山などを対象に、火山ガスや熱水流体の化学組成を分析し、熱水系での火山活動との関連性に関する調査を行った。多成分火山ガス連続装置の観測精度向上のため、リアルタイムで補正する手法を提案した。二酸化硫黄（SO₂）放出率計測の自動化へ向け連続観測試験を阿蘇山で開始し、二酸化硫黄は問題なく定量でき、既存手法と比べ値に大きな差異がないことを確認した。
- ・二重偏波気象レーダー等による噴煙の観測結果から、噴煙に含まれる火山灰等の分布を定量的に推定する手法の開発を行うと共に、2021 年阿蘇山噴火の解析を行った。2021 年福徳岡ノ場噴火と 2022 年フンガ・トンガーフンガ・ハアパイ火山噴火について、気象衛星ひまわりの画像解析を行った。大気との相互作用や各種保存則など火山噴煙の力学を考慮した 1 次元噴煙モデル（NIKS-1D）の開発を進めた。気象衛星ひまわりを用いた火山灰雲の解析値を新しい移流拡散モデル（JMA-ATM）の初期値にデータ挿入法を用いて反映させる仕組みを実装した。

(副課題 1) 地殻変動観測等に基づく火山活動評価

[テーマ 1] 火山活動活発化や噴火へ至るプロセスの解明

- ・伊豆大島で実施している自動光波観測について、気象庁数値予報モデルを使用した気象補正の自動化を行い、補正後のノイズレベルを定量化した。さらに東京管内及び福岡管内の一部火山の光波繰り返し観測データに対して、上記気象補正手法を適用した。
- ・異常の迅速検出に向けて GNSS 観測キネマティック解析に着手した。
- ・昨年度までに機器更新を完了した伊豆大島の稠密な GNSS 観測の結果を用いて、全島的な地殻変動と三原山の局所的な地殻変動を分けて圧力源を推定した。
- ・伊豆大島にて実施してきた重力観測により、三原山において GNSS で観測される沈降に伴うフリーエア効果から期待されるよりも大きな重力増加が生じていること等を明らかにし、成果を大学彙報に取りまとめた。
- ・伊豆大島において UAV を用いた空中熱赤外観測を夏季と冬季に実施し、放熱率の定量化に向けた観測・解析方法の問題点の洗い出しを行った。
- ・伊豆大島の過去の活動における観測量やマグマ供給系に関する既存知見の整理を進めた。
- ・雲仙岳山頂の溶岩ドーム周辺の局所的な地殻変動について、2006 年以降の国内 SAR 衛星データを使った干渉 SAR 時系列解析を実施し、溶岩ドームの東側斜面において東向きかつ沈降の変化が加速していることを検出した。
- ・吾妻山の長期 GNSS 時系列（過去 9 年間）に対して、プレート運動や年周変化を考慮した解析を行い、火山性異常を精密に抽出し、活発化現象の分類化を行った。
- ・大学および海外研究機関との共同研究により火山体浅部の地下水流動システム（蔵王山、田沢湖）や複合的な変動源の存在（アゾレス諸島 Fogo 火山）を明らかにした。そのほか、東北管内の火山で発生した突発的現象（吾妻山の大穴火口の陥没、秋田焼山の火山ガス噴出など）に対する現地調査と火山学的評価を実施した。
- ・フンガ・トンガーフンガ・ハアパイ火山の噴火に伴う地震記録の解析を行い、震動の励起源の高度と規模の推定を行った。その結果、励起源の高度は 40～50km と成層圏上部で、規模（エネルギー）は 1991 年のピナツゴ噴火の 1/50 程度であることを明らかにした。

[テーマ 2] 火山活動の解析・評価のための手法開発

- ・気象庁の数値気象モデルを用いて干渉 SAR の対流圏遅延補正を行うプログラムについて、LA（局地解析）への対応を行った。
- ・GNSS については、モデルトップより高高度の領域を計算に含めるとともに、レイトレーシングを実装したことで、天頂遅延量の推定について、顕著な改善が見られた。

- ・ 山体地形を考慮して地殻変動源を求める手法の開発として、海底地形を考慮した地形モデルの作成を行いその影響を調べた。また、三宅島の水準測量データの解析に適用し、地形効果を考慮することで、地下浅部の圧力源を火山性地震の発生域の近くに推定できた。

[テーマ3] 監視観測データの活用的高度化

- ・ 地震波干渉法により得られた速度変化に関して、諸観測量との関係性について調査した。

(副課題2) 化学的手法等による火山活動監視

[テーマ1] 化学分析に基づく火山活動の理解に関する研究

- ・ 霧島山(硫黄山)周辺の火口跡の熱水や湧水に溶存する化学種の組成(Cl/SO₄比)変化から、2022年6月頃および11月下旬頃に硫黄山の山頂域を中心とした活動の高まりを捉えた。箱根山で火山ガスの採取・分析を実施した結果、2021年8月頃に発生した活動の高まりは、消長を繰り返しながら低下傾向にあることを認めた。2022年4月から11月の間に草津白根山湯釜火口湖の化学組成分析を実施し、過去に噴火前後で観察されたような溶存成分(Mg/Cl比)の急激な変化が生じないかどうかを追跡した。本研究期間にはMg/Cl比の上昇は観察されなかった。以上の結果は随時噴火予知連絡会などに提供した。
- ・ 本庁火山監視課が実施する草津白根山湯釜火口湖水の化学分析について分析値の質を向上するための助言・支援を実施した。

[テーマ2] 火山ガス活動のモニタリングに関する研究

- ・ 多成分火山ガス連続装置の観測精度向上のため、センサーの感度変化の挙動を室内実験により明らかにし、リアルタイムで補正する手法を提案した。また、吾妻山2019年の火山活動の事例を解析し、マグマ・熱水の寄与をふまえた監視・評価手法を提案した。
- ・ 二酸化硫黄放出(SO₂)率計測の自動化へ向け現地収録による連続観測の試験を阿蘇山で始めた。試験観測で二酸化硫黄は問題なく定量でき、既存の手法と比べても値に大きな差異がないことを確認した。また、観測システムの耐久試験も行っており、ハード面の問題点の洗い出しを進めた。気象モデルを用いたSO₂放出率推定において、モデルの水平解像度が低い場合(数km程度)は、SO₂プルームの再現性が劣ることが分かった。
- ・ 次期計画に取り組む衛星データを用いた二酸化硫黄放出率の監視技術に関する事前調査を行い、気象モデル(気象庁局地解析値)を活用し活動把握が可能であることを西之島の事例を用いて示した。

(副課題3) 火山噴出物の監視技術とデータ同化に基づく輸送予測

[テーマ1] 気象レーダー等による噴火現象の観測・解析

- ・ 二重偏波気象レーダー等による噴煙の観測結果から、噴煙に含まれる火山灰等の分布を定量的に推定する手法の開発を行った。本手法では、二次元ビデオディストロメーター(2DVD)によって観測された粒径と粒子形状の情報を独立資料として利用する。二重偏波レーダーで観測されたパラメータを説明し得る粒径分布を推定することで、噴出物量を求めることができる。
- ・ 二重偏波化された一般気象レーダー(福岡)のデータを用いて、2021年阿蘇山噴火の解析を行った。その結果、10月14日・20日の噴火は共に水物質の寄与が大きかったが、20日の噴火の方が、噴煙内部の火山噴出物(火砕物)の量が多いことを示した。
- ・ 2021年福徳岡ノ場噴火と2022年フンガ・トンガーフンガ・ハアパイ火山(トンガ海底火山)噴火について、気象衛星ひまわりの画像解析を行った。衛星視差の影響による傘型噴煙の位置ズレは、福徳岡ノ場噴火の事例では北へ約10km、トンガ海底火山噴火の事例では東南東へ約30km生じていた。この衛星画像上の位置ズレが傘型噴煙の面積・半径の解析に与える影響については、衛星天頂角が極度に開いていない限り、無視できることを示した。
- ・ 2021年福徳岡ノ場噴火と2022年トンガ海底火山噴火に伴って発生した雷データの比較解析を行い、トンガ海底火山噴火の方が雷活動(ストローク数・エネルギー)で見た規模が大きいことを示した。また、火山雷の監視が噴火活動の検知・盛衰の把握に有効であることも示した。

[テーマ2] (1) 新しい移流拡散モデルの開発・改良

- ・ JMA-ATMによる再飛散火山灰の予測において、衛星画像における灰雲の位置ズレが検証に与える影響について調査を進めている。
- ・ 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第2期においてSAR干渉解析から抽出された狭域の降灰等層厚線から、JMA-ATMにより広域の降灰量分布を推定する手法を実装した。

[テーマ2] (2) 火山灰データ同化・予測システムの構築

- ・大気との相互作用や各種保存則など火山噴煙の力学を考慮した NIKS-1D の開発を進め、本モデルの性質調査を行って、現実の噴煙でみられる特徴を再現していることを確認した。
- ・気象衛星ひまわりを用いた火山灰雲の解析値（火山灰プロダクト相当）を JMA-ATM の初期値にデータ挿入法を用いて反映させる仕組みを実装した。さらに、その中に含まれる経験的パラメータについて、2018 年 4 月の霧島（新燃岳）などいくつかの噴火事例を用いて最適化を行った。

(2) 当初計画からの変更点（研究手法の変更点等）
(全体)(副課題1) 地殻変動観測等に基づく火山活動評価

特になし。

(副課題2) 化学的手法等による火山活動監視

多成分火山ガス観測データの補正手法については、人工的なガス曝露実験による試みを重点的に行う方針に変更し、これにより、センサーの感度変化の特性を把握することでリアルタイム補正の可能性を提示した（成果は施設等機関研究報告会にて報告済み）。

次期計画に取り組む予定である、衛星データを用いた二酸化硫黄放出率の監視技術に関する事前調査に着手した。

(副課題3) 火山噴出物の監視技術とデータ同化に基づく輸送予測

X バンド MP レーダー (MRI-XMP) は、水平偏波送信の固体電力増幅器 (SSPA) が故障したため、鉛直偏波観測のみに変更した。2022 年 1 月 15 日にトンガ海底火山で大規模な爆発的噴火が発生したため、気象衛星 (Himawari-8, GOES-17) のほか、雷監視ネットワーク (WWLLN) による観測データの解析を行った。

(3) 成果の他の研究への波及状況

(副課題1) 地殻変動観測等に基づく火山活動評価

[テーマ2] で開発した地殻変動源解析プログラムは、文部科学省次世代火山研究推進事業の「シミュレーションによる噴火ハザード予測手法の開発」に活用している。

(副課題2) 化学的手法等による火山活動監視

[テーマ2] で採取された試料は、文部科学省次世代火山研究推進事業の「地球化学的観測技術の開発」において相互に活用している。

(副課題3) 火山噴出物の監視技術とデータ同化に基づく輸送予測

[テーマ2] で開発した JMA-ATM は、文部科学省次世代火山研究推進事業の「シミュレーションによる噴火ハザード予測手法の開発」および内閣府戦略的イノベーション創造プログラムの「衛星 SAR 解析および降灰シミュレーションによる広域降灰厚分布把握技術の開発」に活用している。

(4) 事前・中間評価の結果の研究への反映状況

(副課題1) 地殻変動観測等に基づく火山活動評価

- ・衛星 SAR の気象モデルによる補正については、共同研究の枠組みを通じ、得られた成果を火山・地震等分野を問わず他の SAR 研究者と積極的に共有する方針で開発を進める。
- ・伊豆大島における観測研究については、これまで地殻変動観測からマグマ蓄積過程を捉えてきた。本中期計画ではマグマ上昇を念頭に置き、1986 年噴火時の観測・研究成果を参照しながら、重力観測の意義を再検討するとともに、新たに熱観測に着手することとした。併せて、種々の観測データ変化の検出にとどまらず、それらを引き起こす地下の過程を理解する足掛かりとして、熱・水収支に関わる諸量を取りまとめた概念モデル作成に取り組むこととした。

- ・各種地殻変動データ気象補正法、変動源推定法等の技術開発、伊豆大島における多項目観測データの処理技術や地下概念モデルの作成等については、現業監視・評価等の業務利用を見据えて進める。

(副課題2) 化学的手法等による火山活動監視

- ・気象分野を活用した技術開発として、新たに衛星による二酸化硫黄放出率把握技術を次期計画での研究内容に想定し、事前調査に着手した。

(副課題3) 火山噴出物の監視技術とデータ同化に基づく輸送予測

- ・「降灰観測と比較し数値予報モデルを検証すること」については、NIKS-1D および JMA-ATM の開発・改良において、降灰観測に対する予測検証を行っている。

今後の研究の進め方

(副課題1) 地殻変動観測等に基づく火山活動評価

- ・伊豆大島における多項目観測等による活動評価手法、気象モデルを用いた地殻変動データの補正法、地殻変動源解析法、地震波速度の時間変化の検出法について、成果をとりまとめる。

(副課題2) 化学的手法等による火山活動監視

- ・二酸化硫黄放出率の開発研究に関しては、次期計画の研究内容への円滑な引き継ぎを意識して取り組む。とくに次期計画で新たに着手する衛星を用いた研究については可能な範囲で事前調査による準備を進める。

(副課題3) 火山噴出物の監視技術とデータ同化に基づく輸送予測

- ・MRI-XMPの故障に対しては、二重偏波化された一般気象レーダーのデータ活用も図る。火山灰データ同化・予測システムを構築については、次期中期研究計画での衛星解析のデータ入力も想定して進める。

研究成果リスト

(1) 査読論文：9件

1. Kensuke Ishii, Akira Nishijo, Takehiro Koyaguchi, Yujiro J. Suzuki, 2022: A physics-based source model for real-time tephra-dispersal forecasting for weak eruption plumes. *Journal of Applied Volcanology*, 11:15.
2. Tomoya Obase, Hirochika Sumino, Kotaro Toyama, Kaori Kawana, Kohei Yamane, Muga Yaguchi, Akihiko Terada, and Takeshi Ohba, 2022: Monitoring of magmatic-hydrothermal system by noble gas and carbon isotopic compositions of fumarolic gases. *Scientific Reports*, 12:17967.
3. Chikita K. A., K. Amita, H. Oyagi, and J. Okada, 2022: Effects of a Volcanic-Fluid Cycle System on Water Chemistry of a Deep Caldera Lake: Lake Tazawa, Akita Prefecture, Japan. *Water*, 14(19), 3186.
4. Araujo, J., F. Sigmundsson, T. Ferreira, J. Okada, M. Lorenzo, R. Silva, R. Carmo, and J.L. Gaspar, 2022: Multiple inflation and deflation events from 2004 to 2016 at Fogo (Agua de Pau) volcano, Sao Miguel, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 432.
5. Chikita K. A., A. Goto, J. Okada, T. Yamaguchi, and H. Oyagi, 2023: Water Cycles and Geothermal Processes in a Volcanic Crater Lake. *Hydrology*, 10(3), 54, doi:10.3390/hydrology10030054.
6. Imura T., M. Ban, K. Tsunematsu, A. Goto, J. Okada, and M. Kuri, 2023: Geological constraints on volcanic-fluid pathways at the Maruyamasawa-Fumarolic-Geothermal-Area, and its relation to the present magmatic-hydrothermal activity in Zao Volcano, Tohoku, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 437, 107793, doi:10.1016/j.jvolgeores.2023.107793.

7. 菅原道智, 松本 享, 川村 安, 森 健彦, 平松秀行, 火山ガス成分観測グループ, 2023: ガス検知管を用いた火山ガス成分観測の測定手法とその有用性について. 駿震時報(論文). (in press)
8. 河波俊和, 田町勇氣, 森 健彦, 2023: 火山ガス拡散予想ツールの開発. 駿震時報(論文). (in press)
9. 新堀敏基, 林 昌宏, 石元裕史, 2023: 気象衛星による大規模噴煙解析ー2022年1月15日 トンガ海底火山噴火の事例ー. 駿震時報(論文). (in press)
10. 鬼澤真也, 西山竜一, 今西祐一, 大久保修平, 安藤 忍, 長岡 優, 島村哲也, 平山康夫, 石原昂典, 松田健助, 金子祐也, 上田義浩, 谷田部史亮, 渡邊篤志, 安藤美和子, 坂下至功, 2022: 伊豆大島における火山活動の解明と活動評価への適用に向けた合同重力観測. 東京大学地震研究所彙報. (in press)
11. 柳澤宏彰, 及川輝樹, 川口亮平, 木村一洋, 伊藤順一, 越田弘一, 加藤幸司, 安藤 忍, 池田啓二, 宇都宮真吾, 坂東あいこ, 奥山 哲, 鎌田林太郎, 兒玉篤郎, 小森次郎, 奈良間千之, 2022: 新潟焼山火山 2016 年噴火ー活動推移・噴出物を基にした噴火モデルー. 火山, 67, 295-317.

(2) 査読論文以外の著作物(翻訳、著書、解説等): 4 件

1. 川口亮平, 2023: マグマ移動シナリオに基づく地殻変動シミュレーション. 防災科学技術研究所研究資料, 487, 66-69.
2. 鬼澤真也, 2023: 既存知見に基づく伊豆大島噴火シナリオ改善に向けた検討. 防災科学技術研究所研究資料, 487, 45-50.
3. 高木朗充, 2023: 伊豆大島の火山活動の推移予測に資する観測体制の維持と重要な観測項目ー噴火警戒レベルを参照してー, 防災科学技術研究所研究資料, 487, 90-93.
4. 谷口無我, 平山康夫, 大場 武, 沼波 望, 2022: 噴火により放出された火山灰について. 昭和 37 年(1962 年)の焼岳火山噴火資料集, 9p.

(3) 学会等発表: 48 件

ア. 口頭発表: 20 件

・国際的な会議・学会等: 2 件

1. Ohba T., M. Yaguchi, N. Numanami, and S. Toyoshima, Correlation between the rate of increase in the He/CH₄ ratio of volcanic gas and the number of earthquakes at Mt Hakone, The 14th CCVG Field Workshop, 2022 年 11 月, Perú, Arequipa
2. Ishikawa, A., T. Nishimura, G. Lacanna, H. Aoyama, R. Kawaguchi, E. Fujita, T. Yamada, T. Miwa, and M. Ripepe, Pre-explosive ground deformations induced by normal Strombolian and paroxysmal activities at Stromboli volcano, 5a Conferenza Alfred Rittmann, 2022 年 9 月, イタリア, カターニャ

・国内の会議・学会等: 18 件

1. 谷口無我, 大場 武, 福岡管区気象台, 鹿児島地方気象台, 宮崎地方気象台, 熱水分析による霧島山(硫黄山)の火山活動モニタリング, 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト 課題 B サブテーマ成果報告会「九州の火山」, 2023 年 1 月, オンライン
2. 大場 武, 谷口無我, 草津白根山湯釜火口湖水および火山ガス組成のモニタリングにより明らかにされた長周期火山活動サイクル, 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第2次)「多項目モニタリングにもとづく火山活動の中期的評価と推移モデルの構築」研究集会(令和4年度), 2023 年 1 月, オンライン開催
3. 高木朗充, 福井敬一, 谷口無我, 岡田 純, 火山ガスと地球物理学観測から推定される吾妻山 2018~2019 年の火山性異常, 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第2次)「多項目モニタリングにもとづく火山活動の中期的評価と推移モデルの構築」研究集会(令和4年度), 2023 年 1 月, オンライン開催

4. 石井憲介, 小屋口剛博, 気象庁の火山灰予測業務と1次元噴煙モデル, 地球表層における重力流のダイナミクス, 2022年12月, 東京
5. 高木朗充, 福井敬一, 谷口無我, 岡田 純, 火山ガスと地球物理学観測から推定される吾妻山2018~2019年の火山性異常, 日本火山学会2022年度秋季大会, 2022年10月, 静岡県三島市
6. 佐藤英一, 二重偏波レーダーによる大気中の火山灰量推定手法についてー初期解析結果ー, 日本火山学会2022年度秋季大会, 2022年10月, 静岡県三島市
7. 吉田康宏, 綿田辰吾, 2022年1月15日フンガ・トンガーフンガ・ハアパイ火山 噴火に伴う大気・固体地球のカップリングモードの励起, 日本火山学会2022年度秋季大会, 2022年10月, 静岡県三島市
8. 寺田暁彦, 鈴木レオナ, 谷口無我, 大場 武, 湖水濃度変動から示唆される草津白根山浅部熱水循環の時間変化, 日本火山学会2022年度秋季大会, 2022年10月, (ハイブリッド)
9. 若松 海, 寺田暁彦, 角野浩史, 小長谷智哉, 谷口無我, 大場 武, 草津白根火山・湯釜火口周辺における土壌ガス中のヘリウム・炭素同位体比ー土壌ガスの起源ー, 日本火山学会2022年度秋季大会, 2022年10月, (ハイブリッド)
10. 森 健彦, 入山 宙, 河波俊和, 岩本征大, 井上秀穂, 阿蘇火山における二酸化硫黄放出率の準連続観測ーその1ー, 日本火山学会2022年度秋季大会, 2022年10月, 静岡県三島市
11. 高木朗充, 伊豆大島の火山活動の推移予測に資する観測体制の維持と重要な観測項目, 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト 火山PJ 課題間連携研究 伊豆大島ワークショップ, 2022年10月, 東京都文京区
12. 鬼澤真也, 既存知見に基づく伊豆大島噴火シナリオ改善に向けた検討, 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト 火山PJ 課題間連携研究 伊豆大島ワークショップ, 2022年10月, 東京都文京区
13. 川口亮平, マグマ移動シナリオに基づく地殻変動シミュレーション, 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト 火山PJ 課題間連携研究 伊豆大島ワークショップ, 2022年10月, 東京都文京区
14. 高木朗充, 火山学の進展と火山活動の評価体制, 日本地球惑星科学連合2022年大会, 2022年5月, 千葉県千葉市&オンライン
15. 寺田暁彦, 鈴木レオナ, 谷口無我, 大場 武, 濃度時系列データに基づく火口湖底活動の定量的評価と濃度変動予測モデルー草津白根山・湯釜火口湖への適用ー, JpGU meeting 2022, 2022年5月, 千葉県千葉市&オンライン
16. 豊島誠也, 大場 武, 沼波 望, 谷口無我, 箱根火山ガス中の硫黄同位体比に関する考察, JpGU meeting 2022, 2022年5月, 千葉県千葉市&オンライン
17. 大場 武, 谷口無我, 沼波 望, 豊島誠也, 箱根山火山ガス He/CH₄ 比の上昇速度と地震回数との関係, JpGU meeting 2022, 2022年5月, 千葉県千葉市&オンライン
18. 小長谷智哉, 角野浩史, 外山浩太郎, 大場 武, 谷口無我, 石橋純一郎, 霧島硫黄山噴気中のヘリウム・炭素同位体組成の時間変動, JpGU meeting 2022, 2022年5月, 千葉県千葉市&オンライン

イ. ポスター発表 : 28 件

・国際的な会議・学会等 : 4 件

1. Sato, E., Volcanic ash estimation method using dual-polarization weather radar, 国際火山学及び地球内部化学協会2023年学術総会, 2023年2月, ニュージーランド, ロトルア
2. Satoshi OKUYAMA, Shinobu ANDO and Toshiki SHIMBORI, InSAR Tropospheric Delay Correction using JMA Numerical Weather Model, The Joint PI Meeting of JAXA Earth Observation Missions FY2022, 2022年11月, (ハイブリッド)
3. Numanami N., T. Ohba, and M. Yaguchi, Multivariate analysis of river water and hot spring water of Hakone volcano, The 14th CCVG Field Workshop, 2022年11月, Perú, Arequipa
4. Toyoshima S., T. Ohba, N. Numanami, and M. Yaguchi, A Study on Sulfur Isotope Ratios in Hakone Volcanic Gas, The 14th CCVG Field Workshop, 2022年11月, Perú, Arequipa

・国内の会議・学会等：24 件

1. 岡田 純, 越谷英樹, 山岸 遼, 秋田焼山における火山ガス調査－専門家および関係機関の連携による安全確保, 日本火山学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, (ハイブリッド)
2. 島村哲也, 川口亮平, 鬼澤真也, 稠密 GNSS 観測による伊豆大島の地殻変動源の推定, 日本火山学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, オンライン
3. 大場 武, 谷口無我, 草津白根山における地球化学的モニタリング, 日本火山学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, (ハイブリッド)
4. 入山 宙, 鬼澤真也, 新堀敏基, 高木朗充, 気象庁数値予報モデルを用いた光波測距の気象補正における精度検証, 日本火山学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, オンライン
5. 久保武史, 星原一航, 小枝智幸, 中橋正樹, 佐藤英一, 二重偏波レーダーを用いた火山噴煙の解析的研究, 日本火山学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, オンライン
6. 谷口無我, 大場 武, 福岡管区气象台, 鹿児島地方气象台, 宮崎地方气象台, 熱水の化学分析による霧島山えびの高原(硫黄山)の火山活動モニタリング, 日本火山学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, (ハイブリッド)
7. 安藤 忍, 奥山 哲, 高木朗充, 干渉 SAR 時系列解析を用いた雲仙岳溶岩ドームの変形, 日本火山学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, オンライン
8. 河波俊和, 森 健彦, 入山 宙, 準定常ガス拡散モデルを用いた二酸化硫黄放出率推定, 日本火山学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, (ハイブリッド)
9. 橋本明弘, 森 健彦, 新堀敏基, 高木朗充, 気象予測モデルを併用した新しい二酸化硫黄放出率推定手法の開発：その 4, 日本火山学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 静岡県三島市
10. 川口亮平, 宇平幸一, 水準測量データと GNSS 連続観測データに基づく三宅島の地殻変動源の推定, 日本火山学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, オンライン
11. 新堀敏基, 林 昌宏, 石元裕史, 2022 年 1 月 15 日トンガ海底火山噴火により発生した傘型噴煙のひまわり 8 号による解析(その 2), 日本火山学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, オンライン
12. 奥山 哲, 安藤 忍, 新堀敏基, 鬼澤真也, 気象研究所による GNSS 対流圏遅延補正プログラムの開発(第 2 報), 日本測地学会第 138 回講演会, 2022 年 10 月, 鹿児島(ハイブリッド)
13. 谷口無我, 大場 武, 福岡管区气象台, 鹿児島地方气象台, 宮崎地方气象台, 熱水の化学分析による火山活動モニタリングー霧島山えびの高原硫黄山の例ー, 2022 年度日本地球化学会第 69 回年会, 2022 年 9 月, 高知市
14. 佐藤英一, 海底火山噴火に伴って発生した雷について, 日本地球惑星科学連合 2022 年大会, 2022 年 6 月, 千葉県千葉市&オンライン
15. 佐藤英一, 二重偏波気象レーダーで観測した 2021 年阿蘇山噴火, 日本地球惑星科学連合 2022 年大会, 2022 年 6 月, 千葉県千葉市&オンライン
16. 星原一航, 久保武史, 小枝智幸, 中橋正樹, 佐藤英一, 二重偏波レーダーを用いた火山噴煙の解析的研究(初期解析結果), JpGU meeting 2022, 2022 年 6 月, 千葉県千葉市&オンライン
17. 大石雅之, 山村卓也, 山岸 遼, 鈴木康太, 越谷英樹, 作野 魁, 岡田 純, 吾妻山大穴火口底における陥没現象, JpGU meeting 2022, 2022 年 6 月, 千葉県千葉市&オンライン
18. 奥山 哲, 安藤 忍, 齊藤一真, 村上亮, 干渉 SAR 時系列解析により検出された恵山における局所的地殻変動, JpGU meeting 2022, 2022 年 6 月, 千葉県千葉市&オンライン
19. 安藤 忍, 鬼澤真也, 伊豆大島におけるドローンを用いた熱赤外観測, JpGU meeting 2022, 2022 年 6 月, 千葉県千葉市&オンライン
20. 川口亮平, 火山の地形を考慮した地殻変動計算システムの開発ー海底地形の効果の検討ー, JpGU meeting 2022, 2022 年 6 月, 千葉県千葉市&オンライン
21. 谷口無我, 大場 武, 寺田暁彦, 湖水の化学組成からみた草津白根山湯釜火口での最近(1982 年以降)の噴火の要因, JpGU meeting 2022, 2022 年 6 月, 千葉県千葉市&オンライン

22. 新堀敏基, 林 昌宏, 石元裕史, 2022 年 1 月 15 日トンガ海底火山噴火により発生した傘型噴煙のひまわり 8 号による解析, 日本地球惑星科学連合 2022 年大会, 2022 年 5 月, オンライン
23. 新堀敏基, 石井憲介, 清水慎吾, 小澤 拓, 藤田英輔, 衛星 SAR を用いた降灰量分布推定手法の研究: 降灰シミュレーションによる広域分布推定, 日本地球惑星科学連合 2022 年大会, 2022 年 5 月, オンライン
24. 新堀敏基, 林 昌宏, 石元裕史, 2022 年 1 月 15 日トンガ海底火山噴火により発生した火山灰雲のひまわり 8 号による解析, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン

(4) 投稿予定論文: 1 件

1. 入山 宙, 鬼澤真也, 新堀敏基, 高木朗充: 気象庁数値予報モデルを用いた気象補正に伴う光波測距のノイズレベル定量化. 験震時報 (予定).

報道・記事: 1 件

1. 谷口無我 信濃毎日新聞「焼岳の水蒸気爆発火山灰で裏付け – 1962 年の噴火で気象庁分析特徴的な鉱物含有 –」2022 年 11 月 8 日

その他 ((3)「成果の他の研究への波及状況」関連)

- 内閣府戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 2 期
「国家レジリエンス (防災・減災) の強化」(平成 30~令和 4 年度)
- ・テーマ II 「被災状況解析・共有システム開発」
文部科学省次世代火山研究推進事業 (平成 28~令和 7 年度)
- ・課題 B-3 「地球化学的観測技術の開発」
- ・課題 C-3 「シミュレーションによる噴火ハザード予測手法の開発」

A シームレスな気象予測の災害・交通・産業への応用に関する研究

研究年次：4年目／5年計画（令和元年度～令和5年度）

研究代表者：行本誠史（応用気象研究部長／令和元年度）

高槻 靖（応用気象研究部長／令和2年度）

加藤輝之（応用気象研究部長／令和3年度）

徳廣貴之（応用気象研究部長／令和4年度）

課題構成及び研究担当者

（副課題1）地域気候モデルによる予測結果の信頼性向上に関する研究

副課題代表者：村田昭彦

〔応用気象研究部〕村田昭彦、野坂真也、佐々木秀孝（令和元～3年度）、仲江川敏之、村崎万代、川瀬宏明、福井 真

〔気候・環境研究部〕高薮 出（令和2年度～）

〔併任：大気海洋部〕ト部祐介、山田 賢、加藤 尚（以上、令和元年度）、岡部裕己（令和2年度～）、後藤敦史（令和2年度）、原田 昌（令和3年度）、瀬崎歩美（令和3年度～）、若松俊哉（令和4年度）

〔客員研究員〕大泉三津夫

（副課題2）防災・交通分野への気象情報の活用

副課題代表者：小畑 淳（令和元～4年度）、高野洋雄（令和4年度）

〔応用気象研究部〕小畑 淳（令和元～4年度）、山口宗彦、川端康弘、太田琢磨（令和4年度）、高野洋雄（令和4年度）

（副課題3）産業活動に資する気候リスク管理

副課題代表者：仲江川敏之

〔応用気象研究部〕仲江川敏之、村崎万代、川瀬宏明、村田昭彦、野坂真也、佐々木秀孝（令和元～3年度）

〔台風・災害気象研究部〕加藤輝之

〔気候・環境研究部〕小林ちあき、高薮 出（令和2年度～）

〔全球大気海洋研究部〕高谷祐平

〔併任：地球環境・海洋部〕萱場亙起、宮脇祥一（令和元年度）、後藤敦史、池田友紀子（以上、令和3年度）、平井雅之、辻健太郎（以上、令和4年度）

〔客員研究員〕大竹秀明（令和2年度～）、宮坂貴文、伊東瑠衣、三浦陽介（令和3年度～）

研究の動機・背景

（社会的背景・意義）

（副課題1）地域気候モデルによる予測結果の信頼性向上に関する研究

温暖化を巡っては、平成27年11月に「気候変動の影響への適応計画」について閣議決定がなされ、環境省は「気候変動適応情報プラットフォーム」（A-PLAT）を設けた。ここには、気象庁において作成した気候温暖化予測情報第9巻（平成29年3月）の内容も掲載されている。さらに、平成30年6月には「気候変動適応法」が成立、平成30年12月1日に施行された（これに伴い国立環境研究所内に「気候変動適応センター」が設立された）。これにより、各地方自治体には温暖化対策策定が求められるようになり、第1次情報としての数値モデルによる温暖化予測情報はより一層重要性を増す。そのため、気象庁は文科省と連携をとり「気候変動に関する懇談会」を平成30年6月に発足させ、気候予測情報の提供体制を整えつつある。このほかに、国交省でも治水計画に「気候変動」を取り込むことを計画しており、「気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会」が平成29年に設けられ議論が進んでいるところである。

(副課題2) 防災・交通分野への気象情報の活用

国土強靱化にかかわる我が国の防災のあり方については、国交省の「新たなステージに対応した防災・減災のあり方に関する懇談会」(平成27年1月)において議論が進められてきている。

「新たなステージ」とは、近年頻発するようになった大雨・洪水の現状(ステージ)を表している。WMO大気科学委員会でも、「気象業務のための科学(Science for Services)」を提唱しており、防災・減災に直結する気象情報の提供に資する研究の推進を行っている。

エンドユーザーからの要望として防災・減災につなげるべく、①予報精度の向上、②時間的猶予の増大、③情報伝達の改善の3つが挙げられる。このうち①・②については気象庁で取り組むべき課題として、国交省の交通政策審議会気象分科会においても提言されている(平成30年8月)。このように、情報の改善といってもユーザーまで相互に関連することは明らかであり、その意味でも、そのような俯瞰的な研究開発が今後求められる。

(副課題3) 産業活動に資する気候リスク管理

2009年の第3回世界気候会議で、災害軽減や生活の質を向上させるために気候情報を活用する枠組み、Global Framework for Climate Service(GFCS)の実施が採択され、欧米では大型研究プロジェクトを始めとして、各国の気象機関も気候情報の利活用についての研究が盛んに行われている。WMO気候委員会でも、GFCSに貢献するための専門家チームが複数結成されて活動を行っている。

日本では当庁気候情報課が気候リスク管理の調査を継続的にを行っている。また、再生可能エネルギー分野では気象研究所を始めとして気象情報の利活用研究が盛んに行われている。また、国土交通省の生産革命プロジェクト31のうちのひとつとして、気象ビジネスの創出～気象情報の利活用の促進～が現在進行している。こうした動きを受けて、気象ビジネス推進コンソーシアムが立ち上げられ、産業界で気象情報を利活用する機運が高まっている。

(学術的背景・意義)**(全体)**

ここでは、時間的にシームレスな気象予測をいかに生産性革命・国土強靱化に活かしていくかという課題設定となる。「温暖化予測」は10年～100年の時間スケールである。他方、「産業気象」となるとその時間スケールは数週間～数年スケールが中心となる。また、「災害・交通」はより短く、数時間～数日の時間スケールが中心となる。したがって、それぞれにおいて気象予測研究側での最適な取り組みは異なってくる。ところが、気象(ないしは気候)情報の流れとしてみると、これらはいずれも影響評価研究を通しての行政のエンドユーザーへ向けての流れとなり、これらは同様のパターンを呈する。そこで、ユーザーとの橋渡しという視点(階層間トランスレーターという立場)から課題を整理すると互いに応用可能な技術が数多く見えてくるため、そこには新しい学問の芽があると考えられる。特に本課題は気象研究所で閉じた課題にはならないため、外部機関との共同研究、外部予算の獲得により効率の良い研究体制が取れることが期待される。地方共同研究もまた然りである。

農業分野は農業気象、航空分野は航空気象というように、気象データを十分に利活用した様々な分野がある。それ以外の産業分野では、上述の通り再生可能エネルギー分野で研究が勢力的に行われているものの、実用化には更なる研究が必要な状況である。非常に広い産業分野から見れば、ほんの少しの分野での調査・研究が行われているだけで、潜在的に気象情報が有用な産業分野は広範な筈であるが、まだ調査・研究が未着手というのが現状である。これらの潜在的分野で気象情報を利活用できれば、国内的には生産性革命に、国際的にはGFCSに貢献することができる。また、気象情報が有用な産業分野は取りも直さず、温暖化適応が必要とされる分野でもあり、温暖化適応研究にも貢献できる。

(気象業務での意義)**(副課題1) 地域気候モデルによる予測結果の信頼性向上に関する研究**

社会的背景でも述べたように、温暖化適応に関しては法律の施行により政府一体となって取り組むことが明記されている。そのため、気象庁・気象研究所も本法律の施行に伴い国立環境研究所内に整備された「気候変動適応センター」並びにその地方中枢と緊密な連携を取りつつ業務を進めていくことになる。その際、業務の円滑な実施に向けては、温暖化適応センターと地理的に近く研究交流も従来から進んでいる気象研究所がセンターとよく連携を取ることが温暖化対策行政への気象庁の寄与にとり、非常に重要になると考えられる。また、気象庁はこの情勢下、国交省・文科省とも連携して温暖化対策策定に貢献する体制をとるが、そこでも研究所の貢献が期待される。

(副課題2) 防災・交通分野への気象情報の活用

大雨や台風など顕著な現象に対する防災気象情報の拡充は喫緊の課題であり、予報精度の向上とともに予報の不確実性情報等の重要性が増している。メソアンサンブル予報など本庁予報官等を支援するデータや資料が増加している一方、それらを短時間で適切に解析するためには、効率的で効果的なプロダクトやガイダンスの開発が必要である。本副課題では、本庁予報課や気象研究所のデータ同化・数値予報モデル課題、副課題1、3、及び国内外の関係機関と連携して、これらの課題に取り組む。

(副課題3) 産業活動に資する気候リスク管理

産業で利活用できる気象情報を明らかにし、また生産性の向上に貢献することは、本庁気候情報課で行っている気候リスク管理の調査に貢献できるほか、温暖化予測情報とそれに付随するデータセットの利活用にも貢献が期待される。更に、気象ビジネス推進コンソーシアムの事務局を行っている本庁情報利用推進課による産業との連携について、本研究成果を通して推進することができる。

研究の目的**(全体)**

気象情報を利活用し、豊かで安全な生活をもたらすような世の中を実現することが目的である。その中には、気象予報・予測精度の向上とともに、気象情報の利用に関し不確実性の観点も含め各分野の専門家と協働・協創を行うことも含まれる。

(副課題1) 地域気候モデルによる予測結果の信頼性向上に関する研究

適応策策定に資する高い確度の地域気候予測情報を創出するため、地域気候予測結果にばらつきをもたらす要因を分析し、予測の不確実性を低減する。

(副課題2) 防災・交通分野への気象情報の活用

アンサンブル予報を含む数値予報データ等を利用し、防災業務に資するプロダクトや新たな予報ガイダンスの開発を行う。

(副課題3) 産業活動に資する気候リスク管理

1週間～季節予測を用いた気象・気候リスクを管理する事例研究を通して、必要とされるデータの過去観測・気象予測データの利用可能性と予測精度について整理し、気候リスク管理が生産性向上をもたらす潜在的な産業分野の開拓を通して、気象・気候リスク管理による幅広い分野での気候情報の利活用を目指す。

研究の目標

本研究課題では、既存の課題の解決のみではなく、気象側からのデータ提供とユーザーのニーズとのマッチングを図ることで、課題発見型課題となることも視野に入れている。

(副課題1) 地域気候モデルによる予測結果の信頼性向上に関する研究

- ①地域気候モデル及び数値実験設定の改良
- ②モデルによる再現・予測結果に対する信頼度評価
- ③モデルによる再現・予測結果における物理的メカニズムの理解

(副課題2) 防災・交通分野への気象情報の活用

- ①全球・メソアンサンブル予報の利活用
- ②防災業務に資する予報ガイダンスの開発
- ③予報大外し事例の抽出

(副課題3) 産業活動に資する気候リスク管理

- ①異業種・産学官交流に基づく各産業分野の気候リスク管理の需要調査・連携
- ②週間～季節予測情報を利活用した気候リスク管理に関する先進的研究とデータ整備
- ③利活用の裾野を拡大するための簡便な産業分野別気候指標と管理手法の開発

研究成果

(1) 今年度得られた成果の概要

(全体)

地域気候モデルを用いた研究では、気象庁の現業数値モデル asuca をベースとした地域気候モデルの開発を引き続き進めるとともに、強風の将来予測結果の解析や積雲パラメータリゼーションの効果の強弱による強雨域への影響調査等を実施した。防災・交通分野への気象情報の活用では、台風発生に関する環境場の調査等に取り組むとともに、洪水予測について粒子フィルタによる水位観測データ同化手法の開発、また高潮予測への波浪の効果を考慮する手法の検討も開始した。産業活動に資する気候リスク管理に関わる研究では、JRA-55 ダウンスケーリングによる気候等の再現性の検証や極端気候指標の長期トレンドの解析を実施した。また、再エネ、治水等の分野で気候リスク管理に関する共同研究も進めた。

(副課題1) 地域気候モデルによる予測結果の信頼性向上に関する研究

①地域気候モデル及び数値実験設定の改良

- asucaをベースとした地域気候モデルで、長期間の積分が実施できるように実行環境を整備した。asucaへの移植を念頭にNHRCMに導入されている都市モデルSPUCをオフラインモデル化した。オフライン都市モデルを用いてシミュレーションした結果、NHRCMと結合したオンラインモデルと比べ都市内の温度が高くなる傾向があったため、都市内部のパラメータ調整を行った。
- スペクトルナッジングの計算を鉛直層毎に分割し並列化することで、高速実行できるように asuca ベースの地域気候モデルを改良した。日本域を対象としたテスト計算では、計算結果の完全一致とともに、実行時間が約 33%短縮（1.5 倍の高速化）されたことを確認できた。

②モデルによる再現・予測結果に対する信頼度評価

- 多数メンバーのシミュレーションにおける台風を解析するため、以前に開発した台風検出ツールを使用し、現在気候のコントロール実験の結果から台風を抽出した。誤検出の削減のため、台風検出ツールの改良を行った。
- 解像度 5 km で日本域を対象とした従来よりも大規模なアンサンブル気候計算の結果を利用し、風の将来変化について調査した。全球平均で 4 K 上昇した気候下では、平均風速は日本の南東を中心にやや弱まる傾向がみられた。また、年最大風速については、日本の南西で弱まる傾向がみられ、夏に記録されていた地点が減少し、秋や冬の記録が増加した。

③モデルによる再現・予測結果における物理的メカニズムの理解

- 地球温暖化に伴う対流抑制指標の変化が降水頻度に及ぼす影響について、8月の西日本を対象に調べた。雲を解像する 2 km 格子モデルのアンサンブルシミュレーションから、対流抑制指標の増加が降水頻度を減少させる可能性があるという結論を支持する結果が得られた。
- 2 km格子の地域気候モデルのメソ降水系の再現性調査のために、平成29年7月九州北部豪雨を模した理想実験を行った。既存の積雲対流パラメータリゼーションの導入に対する感度及びその中に含まれるパラメータに対する感度を調査した。パラメータリゼーションの効果の強弱によって、再現される強雨域の位置が影響されることを確認できた。

(副課題2) 防災・交通分野への気象情報の活用

- 台風の発生について、アンサンブル予測値を活用し、5つの特徴的な環境場に注目して要因を分析し、環境場による発生数や確率の違いを調査した。その結果、特にシアラインパターンで発生数が多いこと、東西風合流域で発生確率が高いことがわかった。これらについては現在論文にまとめている。
- 国内における視程の長期的な変化について、都市部の環境変化等に着目して調査したところ、空港における低視程日数が年々減少していることがわかった。また、各官署における霧の気候学的特徴を調査したところ、多くの地点で霧日数は減少していることがわかった。これは都市化の影響や大気環境が改善したことを示唆している。
- 洪水予測の精度改善のため、粒子フィルターによる水位観測データ同化手法の開発に着手し、同化を入れることで予測誤差の大きい事例の改善を確認した。
- 誤差の大きい高潮予測事例の要因について調査するとともに、改善のため波浪の影響を考慮するための手法について検討を行った。その結果、波浪の影響を受ける地点では高潮の予測誤差と有義波高に強い相関が確認された。波高のみで影響を評価できる見込みが出たことから、波浪の影響を予測へ動的に加味する手法について検討を進めている。

(副課題3) 産業活動に資する気候リスク管理

- ・ JRA-55 ダウンスケーリングによる気候、極端気象の再現性の検証を実施し、観測された気温や降水の気候値やトレンドがよく再現できた。
- ・ 120 年に亘る観測値から極端気候指標を算定し、長期トレンドを解析した結果、大雨関連の気候指標でさえも、有意なトレンドを示す地域は限定的であった。
- ・ 太陽光発電に関する MEPS の利活用では、大外し事例解析を共同で進め、機械学習においても、大外し事例の場合、予測精度は上がらなかった。また、GEPS の利活用については、観測鉛直プロファイルとの比較から、予報値で中層の乾燥バイアスが大外しの一因であることが示唆された。
- ・ 全球アンサンブル予報データを用いた大雨時のダム運用に関する検討を、平成 30 年 7 月豪雨について行い、アンサンブル予報ならびに、再予報の有用性を示した。
- ・ 農業分野での気候予測情報の精度評価や気候指標の利活用について検討を開始した。

(2) 当初計画からの変更点（研究手法の変更点等）

(副課題1) 特になし。

(副課題2) 様々な顕著現象に対する情報のニーズを踏まえ、従来の台風関係の研究に加え、大雨・洪水、高潮・波浪に関する研究も対象とした。

(副課題3) 変更なし。

(3) 成果の他の研究への波及状況**(副課題1) 地域気候モデルによる予測結果の信頼性向上に関する研究**

- ・ asuca をベースとした開発中の地域気候モデルについての情報は P 課題と共有されており、P 課題の副課題1における asuca を用いた各種数値実験を行う際に活用されている。また、文部科学省「気候変動予測先端研究プログラム」の領域課題3「日本域における気候変動予測の高度化」の枠組みにおける利用を念頭に、このモデルが地球シミュレータへ移植された。
- ・ 文部科学省、気象庁が発刊した「気候予測データセット 2022 解説書」の原稿が執筆され、その中で地域気候モデルを用いた研究の結果が活用されている。
- ・ 国土交通省航空局において、気候変動に伴う降水量の変化が空港に与える影響の検討がされており、その一環として空港での排水解析のために地域気候モデルによる気候予測データが利用されている。

(副課題2) 防災・交通分野への気象情報の活用

- ・ 台風の発生に関する調査で得られた知見は、気象庁アジア太平洋気象防災センターに共有され、台風予報の改良に役立てられる。
- ・ 本庁と共同で進めたドボラック再解析の結果は、台風の長期変化特性の説明等に利用される基礎資料となる。
- ・ 粒子フィルターによる洪水予測情報の制度改善は、洪水予測情報の改善に直結する。
- ・ 研究を開始した総合水位に関する予測については、気象庁で R7 年度以降に予定されている高潮警報等の改善、高潮キキクルへの貢献を予定している。

(副課題3) 産業活動に資する気候リスク管理

- ・ WMO 意思決定のための気候情報に関する専門家チームの気候指標利活用の優良事例として、活動報告に掲載予定。

(4) 事前・中間評価の結果の研究への反映状況**(副課題1) 地域気候モデルによる予測結果の信頼性向上に関する研究**

- ・ 中間評価では特段の問題点の指摘はなかった。

(副課題2) 防災・交通分野への気象情報の活用

- ・ 事前評価では、課題を明確にすべきとの意見を頂いた。その指摘に従い、計画の対象と内容をより具体化した上で研究を開始した。中間評価では、主な研究である台風予報や台風と気候変動との関係について比較的高い評価を頂いたため、大きな変更は無く研究を行っている。

(副課題3) 産業活動に資する気候リスク管理

- ・本課題の大義を考えてユーザーの情報創出支援のための環境構築にも取り組むよう、研究計画を一部修正して実施すべきとの指摘があった。これを受け、以下の取り組みを行うことをとした。
- 1) 種々のデータユーザーに対し、情報インターフェイスやデータサービスに求める機能についてアンケート等による調査と既存のデータ提供者（DIAS, A-PLAT等）側にも現状の課題等について聞き取り調査等を行う。
- 2) これらの結果を考察して成果とする。

今後の研究の進め方
(全体)
(副課題1) 地域気候モデルによる予測結果の信頼性向上に関する研究

- ①気象庁の現業で使用されている数値モデル（asuca）をベースに開発・改良を行ってきた地域気候モデルについて、その性能に関して取りまとめるとともに、今後の課題を把握し、開発の方向性を検討する。
- ②地域気候モデルによる再現・予測結果に対する信頼度評価について、これまでの結果や知見を整理して、より一層の信頼度向上につながる取組を検討する。
- ③温暖化予測シミュレーションで得られた結果から、変化をもたらす物理的メカニズムについて分析を進めるとともに、これまでの解析結果を取りまとめる。

(副課題2) 防災・交通分野への気象情報の活用

- ①台風情報の改善に向け、台風発生等に関する調査を進めるとともに、研究成果を取りまとめる。
- ②観測値のデータ同化手法や融雪の考慮等の洪水予測モデルの高度化を進め、そのインパクト評価を行う。
- ③沿岸域の総合水位を評価する手法の開発に取り組み、その結果を取りまとめる。

(副課題3) 産業活動に資する気候リスク管理

- ①潜在的な気候リスク管理需要で利用される気象観測・予測データの整備・予測精度検証を引き続き行うと同時に、利用のされ方を踏まえた予測精度検証の方法の検討を行う。
- ②気候リスク管理に関する先端的研究を、再生可能エネルギーや治水分野において外部機関と引き続き協力して実施し、アンサンブル予測情報を気候リスク管理の研究を推進する。
- ③力学的ダウンスケーリングデータにおける、容易に利用可能な気温、降水量などを用いた、産業別の気候指標の再現性を評価する。また気候指標の可視化について検討を行う。
- ④今年度の成果を含め、これまでの成果をまとめる。

研究成果リスト**(1) 査読論文：14件**

1. 山口宗彦, 仲江川敏之, L. Magnusson, 2023: ダム運用におけるアンサンブル再予報データの利活用, *水文・水資源学会誌*, **36**, 325-335.
2. Sasaki, H., N. N. Ishizaki, A. Murata, H. Kawase, M. Nosaka, 2023: The Importance of Dynamical Downscaling for Explanations of High Temperature Rises in Winter. *SOLA*, **19**, 9-15.
3. Kawase, H., M. Nosaka, S. I. Watanabe, K. Yamamoto, T. Shimura, H. Okachi, T. Hoshino, R. Ito, S. Sugimoto, C. Suzuki, Y. Naka, Y.-H. Wu, S. Fukui, Y. Ishikawa, E. Nakakita, N. Mori, T. Takemi, T. Nakaegawa, A. Murata, T. J. Yamada, and I. Takayabu, 2022: Identifying robust changes of extreme precipitation in Japan from large ensemble 5-km-grid regional experiments for 4K warming scenario. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*. (submitted)
4. Kawase H., S. Fukui, M. Nosaka, S. I. Watanabe, K. Otomo, A. Murata, K. Murazaki, and T. Nakaegawa, 2022: Historical regional climate changes in Japan assessed from a long-term 5 km dynamical downscaling of JRA-55. *Progress in Earth and Planetary Science*. (in press)

5. Kawase H., S. Watanabe, and Y. Imada, 2022: Impacts of historical atmospheric and oceanic warming on heavy snowfall in December 2020 in Japan. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*. (submitted)
6. Kobashi, T., and T. Nakaegawa, 2022: Comment on “comparison of holocene temperature reconstructions based on GISP2 multiple-gas-isotope measurements” by Döring and Leuenberger (2022). *Quaternary Science Reviews*, **298**, 107707.
7. Ishizaki, N., H. Shiogama, N. Hanasaki, K. Takahashi, and T. Nakaegawa, 2022: Evaluation of the spatial characteristics of climate scenarios based on statistical and dynamical downscaling for impact assessments in Japan. *International Journal of Climatology*.
8. Murata, A., M. Nosaka, H. Sasaki, and H. Kawase, 2022: Dynamic and thermodynamic factors involved in future changes in extreme summertime precipitation in Japan projected by convection-permitting regional climate model simulations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **61**, 1201-1217.
9. Nakaegawa, T., and K. Murazaki, 2022: Historical trends in climate indices in relation to surface air temperature and precipitation in Japan for recent 120 years. *International Journal of Climatology*.
10. Mizuta, R., M. Nosaka, T. Nakaegawa, H. Endo, S. Kusunoki, A. Murata, and I. Takayabu, 2022: Extreme precipitation in 150-year continuous simulations by 20-km and 60-km atmospheric general circulation models with dynamical downscaling over Japan by a 20-km regional climate model. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **100**, 523-532.
11. Otaki T., H. Fudeyasu, N. Kohno, T. Takemi, N. Mori, K. Iida, 2022: Investigation of Characteristics of Maximum Storm Surges in Japanese Coastal Regions Caused by Typhoon Jebi (2018) Based on Typhoon Track Ensemble Simulations. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **100**, 661-676.
12. Buket Mesta, Hidetaka Sasaki, Toshiyuki Nakaegawa, Elçin Kentel,, 2022: Changes in precipitation climatology for the Eastern Mediterranean using CORDEX RCMs, NHRCM and MRI-AGCM. *Atmospheric Research*.
13. Tinumbang, A.F.A., K. Yorozu, Y. Tachikawa, Y. Ichikawa, H. Sasaki, T. Nakaegawa, 2022: Investigating the impacts of different time integration methods in land surface models on runoff estimation. *土木学会論文集 B1 (水工学)* .
14. Ose, T., Endo, H., Takaya, Y., Maeda, S., and Nakaegawa, T., 2022: Robust and Uncertain Sea-Level Pressure Patterns over Summertime East Asia in the CMIP6 Multi-Model Future Projections., *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, **100**(4), 631-645.

(2) 査読論文以外の著作物（翻訳、著書、解説等）：4 件

1. Kohno N., C. Fritz, P.L.N. Murty, D. Greenslade, D. Telford, M. C. Uson, and S. Rabitu, 2022: Forecasting Tropical Cyclone Coastal and Marine Hazards and Impacts. *10th International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-10) report*, 1-27.
2. T. Nakaegawa, 2022: High-Performance Computing in Meteorology under a Context of an Era of Graphical Processing Units. *Computers*, **11**, 114.
3. 清野直子, 澤田 謙, 川端康弘, 瀬古 弘, 2022: 都市気象予測の現状と課題 ―都市気象予測の発展を目指して―. *気象データ分析の高度化とビジネス利用*, 49-56.
4. 佐藤正樹, 佐藤芳昭, 八代 尚, 伊藤耕介, 筆保弘徳, 三好建正, 川畑拓矢, 坪木和久, 堀之内武, 岡本幸三, 山口宗彦, 中野満寿男, 和田章義, 金田幸恵, 辻野智紀, 2022: 今後の台風予測研究に関する展望. *天気*, **69**, 285-294.

(3) 学会等発表

ア. 口頭発表:

・国際的な会議・学会等: 2 件

1. Fritz C., N. Kohno, P.L.N. Murty, D. Greenslade, D. Telford, M. C. Uson, and S. Rabitu, Coastal Inundation/ Storm Surge, 10th International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-10), 2022 年 12 月, インドネシア, バリ
2. Kohno, N., S.M.Q. Hassan, and A. Hossain, Case study of storm surges by Bhola Cyclone in 1970, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン

・国内の会議・学会等: 11 件

1. 松島沙苗, 伊藤純至, 福井 真, 廣川康隆, 2022: 日本域領域再解析 (RRJ-Conv.) における線状降水帯抽出の統計解析, 令和 4 年度日本気象学会東北支部気象研究会, 2022 年 12 月 12 日, 仙台.
2. 廣瀬大河, 伊藤純至, 岩崎俊樹, 福井 真, 2022: 日本域領域再解析のアンサンブルメンバーを用いた 2019 年台風第 19 号に伴う大雨の解析, 令和 4 年度日本気象学会東北支部気象研究会, 2022 年 12 月 12 日, 仙台.
3. 廣瀬大河, 伊藤純至, 岩崎俊樹, 福井 真, 2022: 日本域領域再解析アンサンブルによる 2019 年台風第 19 号による東北地方の大雨の検証, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月 26 日, 札幌.
4. 山崎 哲, 福井 真, 2022: 2018 年 2 月の福井豪雪をもたらした JPCZ へのブロッキングの影響, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月 24 日, 札幌.
5. 渡邊俊一, 川瀬宏明, d4PDF5km ダウンスケーリングを用いた日本周辺のポーラーメソサイクロンの将来変化, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
6. 山崎 哲, 福井 真, 2022: 日本海寒帯気団収束帯 (JPCZ) のアンサンブルダウンスケール実験 - 2018 年 2 月の福井豪雪事例 -, 雪氷研究大会 2022 年 10 月 3 日, 札幌.
7. 加藤輝之, アメダス 3 時間積算降水量でみた集中豪雨事例発生頻度の過去 45 年間の経年変化, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
8. 福井 真, 曾我大輝, 小原涼太, 臼井 健, 瀧口海人, 小野佳祐, 廣瀬大河, 松島沙苗, 白川栄一, 伊藤純至, 岩崎俊樹, 山崎 剛, 斉藤和雄, 瀬古 弘, 長期 (2001-2020) 日本領域再解析の再現性の検証, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン.
9. 福井 真, 山崎 剛, 高橋直也, 川瀬宏明, 野坂真也, 東北南部及び北信越の山岳域における積雪の将来変化, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン.
10. 太田琢磨, 気象庁が提供する大雨・洪水警報の危険度分布 (キキクル) について - 現状の課題と今後の取組 -, 2022 年度土砂災害予測に関する研究集会, 2022 年 12 月, 日本
11. 太田琢磨, 大雨災害から身を守るために - キキクルの活用 -, 令和 4 年度山梨県防災シンポジウム, 2022 年 11 月, 山梨県甲府市

イ. ポスター発表

・国際的な会議・学会等: 1 件

1. Sezaki, F., S. Wakamatsu, M. Hirai, A. Murata, H. Kawase, M. Nosaka, and H. Endo, 2022: High-resolution regional global warming projection dataset with bias correction for Japan, The 55th AGU Fall Meeting, 12 - 16 December 2022, Chicago, IL & Online Everywhere, American Geophysical Union.

・国内の会議・学会等: 14 件

1. 福井 真, 曾我大輝, 小原涼太, 臼井 健, 瀧口海人, 小野佳祐, 廣瀬大河, 松島沙苗, 白川栄一, 伊藤純至, 岩崎俊樹, 山崎 剛, 斉藤和雄, 瀬古 弘, 領域再解析 (RRJ-Conv.) における降水の年々変動の検証, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市

2. 村崎万代, 仲江川敏之, 川瀬俊明, 5 km ダウンスケーリングデータにおける極端気候指標の再現性 その2~DSJRA-55 と JRA-55DS の標準化降水指数 (SPI) の比較~, 気象学会 2022 秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
3. 尾瀬智昭, 遠藤洋和, 仲江川敏之, 夏季東アジアの海面気圧将来変化と近年の気候変動, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 北海道札幌市
4. 仲江川敏之, 村崎万代, 日本国内 51 地点で算定された過去 120 年間の気候指標のトレンド, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 北海道札幌市
5. 川端康弘, 日本の気象官署における霧の気候学的特徴, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
6. 村田昭彦, 福井 真, 野坂真也, 牛山朋来, Ralph Allen Acierto, ジャワ島における降水量の再現性向上を目指した地域気候モデルの感度実験, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
7. 渡邊俊一, 川瀬宏明, d4PDF5km ダウンスケーリングを用いた日本周辺のポーラーメソサイクロンの将来変化, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
8. 佐々木秀孝, 石崎紀子, 村田昭彦, 川瀬宏明, 野坂真也, 2022 : NHRCM によって冬季気温上昇量が大きくなると予測された地域について, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
9. 高野洋雄, 対馬弘晃, 林 豊, Entel Mikhail, トンガ火山噴火に伴う潮位振動について, JpGU meeting 2022, 2022 年 5 月, 千葉県千葉市&オンライン
10. 野坂真也, 村田昭彦, 川瀬宏明, 佐々木秀孝, 福井 真, 気候シミュレーションデータセットからの局地風検出手法の検討, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
11. 加藤輝之, アメダス 3 時間積算降水量でみた集中豪雨事例発生頻度の過去 45 年間の経年変化, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
12. 福井 真, 曾我大輝, 小原涼太, 臼井 健, 瀧口海人, 小野佳祐, 廣瀬大河, 松島沙苗, 白川栄一, 伊藤純至, 岩崎俊樹, 山崎 剛, 斉藤和雄, 瀬古 弘, 長期 (2001-2020) 日本領域再解析の再現性の検証, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
13. 川端康弘, 日本の主要空港における視程の変化, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン
14. 村崎万代, 仲江川敏行, 川瀬宏明, 5 km ダウンスケーリングデータにおける極端気候指標の再現性 ~DSJRA-55 と JRA-55DS の比較~, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, オンライン

(4) 投稿予定論文:

1. Nosaka, M., A. Murata, H. Sasaki, H. Satoda, M. Chiba, G.T.Chandrasa, A. Kurniadi, and A. R. Fauziyah, Future Changes in Precipitation Diurnal cycle Due to Global Warming in Jakarta.
2. Ishizaki, N., R. Pinzon, T. Nakaegawa, H. Sasaki. Factors contributing to morning rain in the upper Río Chagres Basin, Panamá” to be considered for publication in Frontiers in Earth Science, section Atmospheric Science. (再査読中)

報道・記事

1. 福井 真, 2022: 「アメダスがない場所も解析可能」急増する大雨予測の救世主? “領域再解析”とは」において領域再解析について解説, 東北放送株式会社「N スタミやぎ」(宮城県内ローカル) 内, 2022 年 12 月 14 日
2. 太田琢磨, 2023: 「元気甲州人」においてキキクルの開発について解説, 山梨日日新聞, 2023 年 2 月 16 日取材

メソアンサンブルを利用した決定論的予測技術の改善

研究年次：1年目／2年計画（令和4年度～令和5年度）

研究代表者：小野耕介（台風・災害気象研究部）

研究担当者

〔札幌管区气象台〕 倉橋 永・野村達郎・荻原弘堯・朝比奈聡司・米川博志

〔函館地方气象台〕 鳥山暁人

〔新千歳航空測候所〕 松澤仁志

〔仙台管区气象台〕 森川浩司・池田 翔・小笠原敦・阿部真治

研究の動機・背景 ※現状、問題点、研究の必要性及び緊急性についても記載 （社会的背景・意義）

わが国は四方を海に囲まれるため海上からの湿潤な空気の影響を受けやすく、夏季は台風・線状降水帯等による豪雨災害が、冬季は季節風による雪害が毎年のように発生する。また近年、地球温暖化の影響とともにこれら自然災害の発生数は増加傾向にある。したがって、このような災害をもたらす気象現象を長いリードタイムを持って精度良く予測することは人命・財産の観点から非常に重要であり、社会的ニーズは高い。しかし、大気はカオス力学系でありその予測精度は初期値に敏感である。特に災害をもたらす激しい気象現象の決定論的な予測は、短時間のうちにその予測可能性が失われる。このため、決定論的予測の信頼度・不確実性を予測するアンサンブル予報技術の研究開発が自然災害をもたらす気象現象の予測には重要となる。さらには、アンサンブル予報から得られるプロダクトを現業予報作業において適切に利活用することが、防災・減災にとって重要である。

（学術的背景・意義）

近年のアンサンブル予報技術の研究は、数値予報モデルの精緻化及び大型計算機の性能向上により、短時間豪雨を対象とした対流を許容する高解像度な数値予報モデルをベースとしたものが主流となっている。このような高解像度のアンサンブル予報技術は豪雨に対する確率予報を可能にし、確率論をベースとした豪雨予測の研究が海外を中心に活発に行われている。

一方、アンサンブル予報プロダクトからは決定論的な予測とは異なる予測シナリオを提供することが可能であり、ヨーロッパ中期予報センターでは気圧場に対してクラスター解析を行うことで、目先数日に起こり得る複数の気象予測シナリオを提供している。このような複数シナリオ技術は激しい気象現象を対象とした短期予報においても重要であると考えられるが、降水現象などを対象とした複数シナリオ技術の研究例は少ない。

（気象業務での意義）

気象庁では現業メソモデル（MSM）の不確実性を予測するために、メソアンサンブル予報システム（MEPS）の運用を2019年度から開始し、MSMの予測に対する信頼度情報等を提供している。全国予報技術検討会資料より、地方官署では注警報作業の支援等を目的としてMEPSの確率論的な利用方法が広まりつつある。一方、決定論的な利用については、MSMを含むクラスターを利用した降水シナリオを検討している調査研究があるものの、その数は少ない。また現業予報作業における時間的な制約を鑑みると、MEPSからの予測を入念に検討することが現実的ではないため、情報の縮約が必要となる。しかし、アンサンブル予報は複数の予測結果を有するため情報量が多く、有効な情報を適切に取り出すことは現業担当者にとって簡単なことではなく、MEPSを利用したプロダクト開発は庁内では進んでいない。

このような背景の下、MEPS予測からクラスター解析を利用して複数の気象予測シナリオを作成することは、MSMの予測が実況と大きく異なる場合にMSM以外の予測シナリオを予報官が想起できるという点で有益であり、決定論的予測をベースとする現業予報作業とも親和性が高いと考えられる。また、MSMより精度の高い予測シナリオを事前に選択できるならば、現業の予測精度改善に直接貢献することができる。したがって、MEPSから複数の気象予測シナリオを作成することは現業予測の改善に大きなポテンシャルを持つと考える。

研究の目的

現在、経常研究課題「台風・顕著現象の機構解明と監視予測技術の開発に関する研究」の副課題2「顕著現象の実態解明と数値予報を用いた予測技術の研究」では、西日本を対象に MEPS に基づく複数の降水予測シナリオの研究・開発を行っている。この研究では、大雨事例において MSM の降水予測精度が悪い際に MEPS がより実況に近い降水シナリオを提供できることを確認している。

そこで、この研究成果を地方官署が注目する豪雨や暴風等の顕著事例に対して適用することで、現業の決定論的予測精度の向上の可能性を探る。特に MEPS 複数シナリオの利用可能性を現業担当者の視点から評価・議論することは、MEPS の現業利用を促進するために重要であるとともに、現業担当者へのアンサンブル予報に対する理解の深化にもつながる。さらには、本研究を通して得られる知見を基に MEPS 複数シナリオ作成技術の高度化についても検討する。

研究の目標

豪雨や暴風等の顕著事例に対して、MEPS からの複数シナリオが MSM の予測より良い予測が提供可能かという観点に着目して事例を解析する。また類似事例を複数解析し、MEPS が得意・不得意な事例及びその理由についてまとめることで、MEPS の利用価値に対する知見を蓄積する。併せて、MEPS が提供する複数シナリオを実況で利用可能な情報と照らし合わせて、予報作業時に MSM より良いシナリオが事前に選択可能なのか、といった視点からも事例を検討し、知見を蓄積する。また、以上の解析及び議論から得られる知見を基に、MEPS 複数シナリオ作成技術の高度化を目指す。

研究成果

(1) 今年度得られた成果の概要

(複数シナリオ技術に対する知見)

MEPS から作成する複数気象シナリオは、対象とする気象現象によってクラスター解析に利用する最適な気象要素が異なる。またクラスター解析を行う領域の大きさは作成される気象シナリオに影響を与える。初年度はこれらの点に着目し、梅雨末期の大雨、温帯低気圧及び季節風による大雪事例を対象に、クラスター解析領域及び気象要素が複数気象シナリオに与える影響を調査した。これらの調査により、事例別にクラスター解析で対象とすべき気象要素への知見（温帯低気圧事例では相当温位が良い一方、冬季季節風では下層鉛直流が良いなど）が得られたとともに、クラスター解析領域については広すぎると望ましい結果が得られないことが明らかとなった（荻原ほか 2022、森川ほか 2022）。

この他に、MEPS が予測する海面更正気圧による複数気象シナリオを高潮予報へ応用する試みについても検討した（倉橋・小野 2022）。また MEPS の予測スプレッドがアンサンブル平均予報誤差に対して過小であった梅雨末期の大雨に対して、初期摂動を改良した予報（Ono 2023, QJRMS）を利用することで、確率論的なスコアに加えて複数気象シナリオによる決定論的予測が改善することを確認した（池田ほか 2022）。

(現業への利用可能性)

野村ほか（2022）では、2022 年 2 月 6 日に発生した局地的大雪により札幌市内の交通網が麻痺した社会的影響の大きい事例に対して、MEPS 複数気象シナリオを利用することで大雪の早期警戒情報が当時の発表より 6 時間程度早く発表できる可能性を明らかにした。

(複数シナリオ作成技術の高度化)

気象研究所において開発した複数シナリオ作成技術について、短期予報現業に適するようクラスター解析領域を府県等に固定する一方、予報時間とともに変化するクラスター内のメンバーシップに柔軟に対応できるよう高度化を行った。本高度化によって決定論的予測精度が改善することを確認した。これらの成果をアメリカ気象学会誌 Weather and Forecasting に投稿した（Ono 2023）。

(最適シナリオの事前選択への知見)

Ono (2023) では最適な気象シナリオを事前に選択するために、予報初期の時点における各アンサンブルメンバーの予測誤差を評価し、誤差の少ないメンバーに着目することで最適クラスターが選択可能か検討した。対流圏中層のトラフが支配的な九州の降水事例に対して調査を行ったところ、予報の初期段階で予測誤差が小さいメンバーは、予報後半において MSM より予測誤差の小さいクラスターに属していることがわかった。このことは最適シナリオの事前選択の可能性を示す例であり、次年度における最適シナリオの選択技術の基礎となる知見である。

(研究参加者の技術力向上)

本共同研究を通じて複数気象シナリオ作成に関連するクラスター解析等の技術に共同研究参加者が習熟するとともに、メソアンサンブル予報への理解が深まったと考えられる。また、札幌管区気象台では有志により Atmospheric Modeling (Kalnay 2003) の輪読会を実施し、独自にアンサンブル予報への理解を深めている。

また、複数気象シナリオデータの解析及び調査研究会の原稿作成等を通じて、NAPS 上で NuSDaS データを入力・描画するツールの開発を行い、気象庁ルーチンデータの取り扱いに習熟した。これらツールの利用方法は Teams 上の Wiki にまとめてあり、来年度の研究における基盤になると考える。

(2) 当初計画からの変更点（研究手法の変更点等）

なし。

(3) 成果の他の研究への波及状況

研究代表者は、MEPS をテーマにした令和4年度航空予報技術検討会に出席し、本地方共同研究について簡単な紹介を行い本共同研究内容の普及に努めた。また、検討会における発表内容への助言を行った。

また、共同研究参加者間の成果を共有する第2回の共同研究内全体打合せにおいて、気象研究所より瀬古部長・川畑室長、数値予報課成田 AP 班長、数値予報開発センターメソ同化 EPS チーム（4名）に参加いただき、本研究への助言をいただく一方で、本共同研究で得られた知見を共有した。特に成田 AP 班長は統合型ガイダンスの開発とそのシナリオ的利用についての業務に携わっており、本共同研究の成果共有は今後の現業予報におけるサブシナリオの在り方に貢献すると考えられる。また、本共同研究において取り上げた事例から MEPS が持つ課題（主にアンサンブルスプレッドの過小とその原因）について、メソ同化 EPS チームに共有したことは MEPS の開発に対して大きな知見を与えるものと考えられる。

2023 年2月には福岡管区気象台の特別談話会において研究代表者が本共同研究内容を講演予定であり、併せて複数シナリオ技術を線状降水帯事例へ適応した結果を紹介する予定である。

(4) 事前・中間評価の結果の研究への反映状況

事前評価では、参加官署が北日本に偏っており線状降水帯を含む大雨事例が対象とならないのではないかと懸念を受けた。この点について、仙台管区気象台では梅雨末期の大雨事例を2件取り上げるとともに、Ono (2023) では九州地方に焦点を当て、降水事例を扱うとともに2年分の統計検証を行った。また、2023 年2月に予定される福岡管区気象台における講演では線状降水帯事例に対して複数シナリオ技術を適用した結果を紹介する予定である。

この他に事前評価では、調査結果は共同研究参加者だけでなく庁内に広く共有しようとのコメントを受けた。この点については上記に述べた通り、航空予報技術検討会において本共同研究を紹介するとともに、共同研究内全体打合せでは気象研・数値予報課の関係者に参加いただくことで、情報共有を図った。この他にも、札幌管区気象研究会及び福岡管区気象台の特別談話会で話題提供を行い、共同研究参加者以外の職員への情報共有を行った。

今後の研究の進め方

今年度は主にクラスター解析技術への習熟及び複数気象シナリオの解析・知見蓄積に焦点を当てた。来年度は予定通り、本手法の現業的利用を視野に入れ予報作業におけるサブシナリオ構築及び最適シナリオの選択に取り組む。また、Ono (2023) では主に Z500 を利用して誤差の小さいクラスターの事前選択に取り組んだが、下層水蒸気場に着目した最適シナリオの選択を検討することで、顕著現象に対する最適シナリオ選択に対する知見を蓄積する予定である。

研究成果リスト**(1) 査読論文：1 件**

1. Ono, K. 2023: Clustering technique suitable for Eulerian framework to generate multiple scenarios from ensemble forecasts. Wea. Forecasting, revised.

(2) 査読論文以外の著作物（翻訳、著書、解説等）：5件

1. 荻原弘堯, 朝比奈聡司, 野村達郎, 米川博志, 鳥山暁人, 松澤仁志, 小野耕介, 2022: メソアンサンブルのクラスタリングによる大雪事例におけるサブシナリオ構築, 令和4年度道央地区気象研究会誌
2. 野村達郎, 松澤仁志, 小野耕介, 2022: 2022年2月6日札幌市大雪事例におけるメソアンサンブルを利用した早期注意情報発表の可能性, 令和4年度道央地区気象研究会誌
3. 倉橋 永, 小野耕介, 2022: 高潮事例におけるメソアンサンブル利用の検討, 令和4年度道央地区気象研究会誌
4. 森川浩司, 池田 翔, 小笠原敦, 小野耕介, 2022: メソアンサンブルのクラスタリングによる決定論的サブシナリオ構築の検討 ―クラスター解析対象領域の変更によるシナリオ分割の改善事例―, 令和4年度宮城地区調査研究会誌
5. 池田 翔, 小笠原敦, 森川浩司, 小野耕介, 2022: メソアンサンブル予報を用いた決定論的予測手法の改善 ―アンサンブルスプレッドの改良による複数シナリオの改善―, 令和4年度宮城地区調査研究会誌

(3) 学会等発表**ア. 口頭発表**

・国際的な会議・学会等：0件
なし。

・国内の会議・学会等：11件

1. 小野耕介, 2022: 時間軸を考慮したクラスタリングによる複数気象シナリオの作成, 日本気象学会 2022年度秋季大会
2. 荻原弘堯, 朝比奈聡司, 野村達郎, 米川博志, 鳥山暁人, 松澤仁志, 小野耕介, 2022: メソアンサンブルのクラスタリングによる大雪事例におけるサブシナリオ構築, 令和4年度道央地区気象研究会
3. 野村達郎, 松澤仁志, 小野耕介, 2022: 2022年2月6日札幌市大雪事例におけるメソアンサンブルを利用した早期注意情報発表の可能性, 令和4年度道央地区気象研究会
4. 倉橋 永, 小野耕介, 2022: 高潮事例におけるメソアンサンブル利用の検討, 令和4年度道央地区気象研究会
5. 森川浩司, 池田 翔, 小笠原敦, 小野耕介, 2022: メソアンサンブルのクラスタリングによる決定論的サブシナリオ構築の検討 ―クラスター解析対象領域の変更によるシナリオ分割の改善事例―, 令和4年度宮城地区調査研究会
6. 池田 翔, 小笠原敦, 森川浩司, 小野耕介, 2022: メソアンサンブル予報を用いた決定論的予測手法の改善 ―アンサンブルスプレッドの改良による複数シナリオの改善―, 令和4年度宮城地区調査研究会
7. 野村達郎, 松澤仁志, 小野耕介, 2022: 2022年2月6日札幌市大雪事例におけるメソアンサンブルを利用した早期注意情報発表の可能性, 令和4年度札幌管区気象研究会・日本気象学会北海道支部研究発表会
8. 森川浩司, 池田 翔, 小笠原敦, 小野耕介, 2022: メソアンサンブルのクラスタリングによる決定論的サブシナリオ構築の検討 ―クラスター解析対象領域の変更によるシナリオ分割の改善事例―, 令和4年度東北地方調査研究会
9. 池田 翔, 小笠原敦, 森川浩司, 小野耕介, 2022: メソアンサンブル予報を用いた決定論的予測手法の改善 ―アンサンブルスプレッドの改良による複数シナリオの改善―, 令和4年度東北地方調査研究会
10. 小野耕介, 2022: アンサンブル予報の有効活用に向けて, 令和4年度札幌管区気象研究会
11. 小野耕介, 2023: 時間軸を考慮したクラスタリングによる複数気象シナリオの作成と最適クラスターの選択, 福岡管区気象台特別談話会（予定）

台風に伴う強風現象に対する地域特性に関する研究

研究年次：1年目／2年計画（令和4年度～令和5年度）

研究代表者：高橋 武（東京管区气象台 気象防災部 防災調査課 調査官）

研究担当者

〔東京管区气象台 気象防災部 防災調査課 調査係〕三輪剛史、小野太郎
各地方气象台担当官

（気象研究所：台風に伴う強風等の解析）

研究代表者：柳瀬 亘（気象研究所 台風・災害気象研究部第一研究室主任研究官）

研究担当者

〔気象研究所 台風・災害気象研究部第一研究室室長〕和田章義
〔気象研究所 台風・災害気象研究部第一研究室研究官〕辻野智紀

（気象研究所：機械学習の習得・応用）

研究代表者：関山 剛（気象研究所 全球大気海洋研究部第三研究室主任研究官）

研究の動機・背景 ※現状、問題点、研究の必要性及び緊急性についても記載

東京管区气象台は、管区推奨調査研究「強風現象に対する地域特性の理解や概念図の再構築（令和3～4年度）」を3年ぶりに立ち上げ、管内8地方气象台とともに取り組んでいるところである。

管区推奨調査研究の初年度となる令和3年度は、先行調査や論文等を収集し、レビューすることにより、都県単位または予報細分区単位での期間・季節ごとの風向・風速の特徴や統計値の整理、気象災害報告等を元にした局地的な強風現象や大規模な強風災害に関する情報を整理した。これにより、各都県の地域特性について理解が深まるという学術的效果だけでなく、管内職員の解析技術や解説力の向上にも一定の効果が得られた。

2年目となる令和4年度においては、整理した事例のうち台風に伴う強風等、顕著現象を中心とした事例を対象に、各官署から1事例以上について各種大気客観解析格子データ（GPV）の解析や非静力学大気モデル（JMA-NHM、asuca等）による数値シミュレーションの実施、計算結果の解析を行うことで当該現象の要因解明に取り組んでいる。そして最終的には、各都県の強風現象の地域特性について2年分の成果を詳細に取りまとめる計画となっている。

しかしながら、これまでに行われた風に関する調査研究では、官署やアメダスの観測地点を対象とした地域特性の把握や要因の考察を行い、その成果は実況値や予測資料を元にしたワークシートとして活用されているものの、強風現象や局地風に関する新たな監視・予測手法の発見、さらには観測点以外の場所に対する推定手法の獲得に至ることが難しい現状となっている。

一方、気象庁においては、平成30年8月の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」を踏まえ、観測・予測精度向上のための技術開発を進める新たなツールの一つとして機械学習の活用にも取り組んでいるところであるが、技術発展が著しく気象分野への応用も始まったばかりであることから、対象とする現象や応用方法も模索段階であり、このツールを有効に使える人材も不足している現状がある。

このような背景のもと、実施中の管区推奨調査研究を進め、最終的なとりまとめを行うが、さらに学術的な研究としてとりまとめるため、気象研究所の専門家による助言や共同の研究等が不可欠であり、担当は向上意欲の高い職員に限定すると効果的である。

これらの共同作業により、向上意欲の高い管内職員にとっては専門家から直接指導を受けることとなり、調査研究に対するさらなるモチベーションの向上につながり、周辺の職員への波及効果が期待でき、気象研究所研究官にとっては気象業務・地域防災の現場で取り上げられる問題点を知ることにより、経常研究等で得た研究成果の理解を多面的に深める機会になる。

研究の目的

本共同研究では、台風に伴う強風等の実態解明に対して、周辺大気環境場との相互作用解明、可能ならば機械学習の利用可能性に関する検討を目的とする。なお、この間、得られた成果の一部は

管区推奨調査研究として、気象防災データベースへの登録や防災情報の読み解き時の資料とするなど、自治体等への解説や普及啓発に有効に活用できる形に整理する。

また、これらの共同研究の実施に当たっては、向上意欲の高い管内職員の現象を把握する力（解析力）や計算機を用いたシミュレーション及び機械学習等の技術力を向上させるとともに、調査研究に対するさらなるモチベーションを向上させることにより、当該職員に加えて周辺の職員への波及効果が期待でき、当庁における人材育成を促進することも目的とする。

研究の目標

- ・数値シミュレーションの結果や観測値、GPV データの解析から、台風を中心とする地域の特有な強風現象及び局地風の機構を周辺大気環境場との相互作用も含めて解明する。
- ・機械学習による強風現象の分類可能性や周辺気象場との相互関係の解明に関する知見の獲得を目指す。
- ・気象解析等で得られた成果と収集した災害資料を合わせ、都県内の強風特性や局地風、強風災害を網羅した資料を作成する。

研究成果

（１）今年度得られた成果の概要

（対象事例の選定）

地域に影響を及ぼした台風について、2019 年台風第 19 号（東京管区、熊谷）、2018 年台風第 21 号（長野、新潟、中部航空、岐阜【個人参加】）、2018 年台風第 24 号（宇都宮）を選定した。また古い事例として、2013 年台風第 26 号及び 2002 年台風第 21 号（宇都宮）及び 1961 年台風第 18 号（新潟）を調査対象として選定した。

（対象事例の解析）

調査対象事例を中心に、観測値及び GPV データを用いて詳細な解析を実施し、その進捗を 6/10 及び 9/30 の気象研究所関係者を交えた Web 会議で共有するとともに、研究官から実験方法や解析手法に関する助言を受けた。

数値実験の環境構築や研究方針及び実験結果の解析について、Microsoft Teams のチームを用いて随時意見交換を行った。

台風に伴う強風の地域特性を調査するため、調査対象事例から、今年度は主に JMA-NHM を用いた再現実験を実施した。

- ・JMA-NHM に関してはメソ解析値や JRA-55 等を親モデルとしたネスティングを行い、官署によっては地形変更による感度実験についても実施した。
- ・asuca に関しては最新バージョンにて 2018 年台風事例を実行する環境を構築した。
- ・数値モデルの実行環境に加え、実験結果の可視化や解析手法について、研究者の知見を得ることができ、技術を習得した。

（強風災害資を網羅した資料の作成）

研究成果を令和 4 年 12 月から令和 5 年 1 月中旬にかけて実施する各都県内調査研究会や地区調査研究会において発表した。一部官署では研究成果を用いた地域防災に資する普及啓発資料を作成中。

（機械学習の利用可能性の検討）

管内 12 官署（東京管区・水戸・宇都宮・熊谷・新潟・富山・福井・長野・岐阜・中部航空・津・成田航空）が機械学習の学習会に参加。

機械学習に関する学習会を月 1 回の頻度で実施。6/10 の Web 会議では、関山主任研究官による機械学習の講演を実施した。また、学習会に必要な書籍を参加官署に配布し、Microsoft Teams を活用して Python による深層学習の学習会を実施している。

参加官署が共同利用する機械学習環境のための PC を東京管区気象台にて購入し、利用環境を構築した。

（２）当初計画からの変更点（研究手法の変更点等）

- ・再現実験には基本 asuca を用い、事例が古い場合に限り JRA-55 を用いた JMA-NHM を用いるとしていたが、asuca の環境構築に時間がかかったこともあり、新しい事例についても JMA-NHM を用いることを可とした。

- ・機械学習を用いた解析について気象研の研究官と検討した結果、パターン分類が難しいと思われる台風による強風に特化することなく、将来的に強風現象の分類可能性を検討するために、まずは強風に限らず広く派生する現象について調査することとした。

(3) 成果の他の研究への波及状況

なし。

(4) 事前・中間評価の結果の研究への反映状況

- ・強風現象について台風事例に限定し、研究内容を絞り込んだ。
- ・意欲のある若手職員が参加できるように、途中参加や個人としてのオブザーバー参加も可能とした。
- ・本研究を効率的に進めるために、地方気象台のサポートは管区が行い、管区に対する技術的な助言を気象研究所が行う体制を整えたが、気象研からの指導や助言が効率的・効果的に行えるように、Microsoft Teams に専用チームを立ち上げて、参加官署間で随時の情報共有を図った。
- ・機械学習を用いた解析の進め方について気象研の研究官と検討した結果、自己組織化マップ (SOM:Self-Organizing Map) を用いたパターン分類を行うためのツールを研究所と管区の共同で開発して管内に共有することとした。

今後の研究の進め方

- ・前年度の成果をもとに、必要に応じて対象事例の感度実験などの数値実験を追加実施し、強風現象の解析をさらに深める。
- ・機械学習による強風現象の分類可能性を検討するため、強風に限らず広く派生する現象について機械学習によるパターン分類について調査する。
- ・全体のとりまとめを行う。

研究成果リスト

(1) 査読論文：

なし。

(2) 査読論文以外の著作物（翻訳、著書、解説等）：

なし。

(3) 学会等発表

ア. 口頭発表

・国際的な会議・学会等：

なし。

・国内の会議・学会等：11 件

1. 池田 廉，高橋祐介，中村皓大，強風現象に対する地域特性の理解や概念図の再構築（2 年目），令和 4 年度長野県内調査研究会、2022 年 12 月 1 日，長野地方気象台
2. 木戸健一朗，青山大輔，大城 展，藤田航平，台風に伴う強風現象に対する地域特性に関する研究，令和 4 年度中部航空調査研究会，2022 年 12 月 2 日，令和 4 年度中部航空地方気象台
3. 志賀和輝，仲居史志，近 慎一，丹波由紀夫，台風に伴う強風現象に対する地域特性に関する研究（管区推奨 2 か年計画 2 年目、地方共同 2 か年計画 1 年目），令和 4 年度栃木県内調査研究会，2022 年 12 月 5 日，宇都宮地方気象台
4. 三輪剛史，高橋 武，小野太郎，鈴木 健，高木美緒，齋藤健太，井上鈴音，小鉢直希，強風現象に対する地域特性の理解や概念図の再構築（2 年計画 2 年目），令和 4 年度東京都内調査研究会，2022 年 12 月 7 日，東京管区気象台
5. 石川治美，水野友雄，大庭淳之介，強風現象に対する地域特性の理解や概念図の再構築（事例の解析）－台風による強風発生概念モデルの作成－，令和 4 年度埼玉県内調査研究会，2022 年 12 月 7 日，熊谷地方気象台

6. 三輪剛史, 高橋 武, 小野太郎, 鈴木 健, 高木美緒, 齋藤健太, 井上鈴音, 小鉢直希, 強風現象に対する地域特性の理解や概念図の再構築(2年計画2年目), 令和4年度関東甲信地区調査研究会, 2023年1月11日, 東京管区気象台
7. 志賀和輝, 仲居史志, 近 慎一, 丹波由紀夫, 台風に伴う強風現象に対する地域特性に関する研究(管区推奨2か年計画2年目, 地方共同2か年計画1年目), 令和4年度関東甲信地区調査研究会, 2023年1月11日, 東京管区気象台
8. 池田 廉, 高橋祐介, 中村皓大, 強風現象に対する地域特性の理解や概念図の再構築(2年目)ー長野県を対象とした基礎的調査ー, 令和4年度関東甲信地区調査研究会, 2023年1月11日, 東京管区気象台

イ. ポスター発表

・国際的な会議・学会等

なし。

・国内の会議・学会等

なし。

(4) 投稿予定論文

1. 東京管区調査研究会誌 No. 55

報道・記事

なし。

その他((3)「成果の他の研究への波及状況」関連)

なし。

2. 3. 研究終了報告

本節には、気象研究所が令和4年度に終了時評価を実施した地方共同研究について、課題毎に研究成果等を掲載した。

2. 3. 1. 地方共同研究

- ・ 二重偏波レーダーを用いた火山噴煙の解析的研究・・・・・・・・・・・・・・・・ 148

2. 3. 2. 緊急研究

- ・ 集中観測等による線状降水帯の機構解明研究・・・・・・・・・・・・・・・・ 152

二重偏波レーダーを用いた火山噴煙の解析的研究

研究期間：令和2年度～令和4年度（3年計画第3年度）

研究代表者：佐藤英一（気象研究所火山研究部第2研究室）

研究担当者：

〔鹿児島地方気象台〕星原一航、久保武史、小枝智幸、中橋正樹、緒方 誠

研究の背景・意義

（社会的背景・意義）

気象レーダーで火山噴煙を捉えた事例は数多くある（Wilson et al. (1966)、澤田 (2003)、Marzano et al. (2013) など）。1980 年のセントヘレンズ火山噴火時には噴煙高度と空間的広がりの時系列が捉えられる（Harris et al. (1981)）など、気象レーダーによる火山噴火（噴煙）監視の有効性も示されてきた。2011 年の霧島山（新燃岳）では、気象庁のレーダーを用いて観測したエコー頂データの推移（新堀・福井, 2012a；新堀・福井, 2012b；新堀ほか, 2013）を移流拡散（数値計算）モデルの初期値に用いることで、その後の降下火砕物（テフラ）の分布を再現することに成功したという研究（Hashimoto et al., 2012；新堀ほか, 2014）もある。こうした成功例とも呼べる事例がある一方で、課題の残る結果となった事例もある。2014 年御嶽山噴火事例では、水蒸気噴火における量的推定（噴煙内部の水物質の影響）に関する課題が、2017～2018 年新燃岳では気象レーダーによる雨灰判別の課題が、明らかとなった。そのような問題解決のキーとなる可能性を持っているのが、二重偏波気象レーダーである。二重偏波レーダーは降水量の高度な推定や降水粒子判別での実績があるが、火山噴煙ではまだ研究フェーズでの利用にとどまっている。日本含め、世界的に現業レーダーの二重偏波化が進んでおり、これら二重偏波レーダーを火山監視に有効活用するためにも、基礎的な研究の積み重ねが必要である。本研究では、二重偏波レーダーを用いた事例解析を進めることで、雨灰判別などの問題解決の糸口を見つけることを目指す。

（学術的背景・意義）

火山噴火の規模は、総噴出物量によって測られる。総噴出物量は、たいていの場合事後の現地調査によって明らかになるが、噴煙高度からおおよそその噴火規模を見積もることが可能である。具体的には、噴出物量（率）は噴煙高度のおよそ 4 乗に比例することが理論（Morton et al. (1956)）及び実際のデータ（Mastin et al. (2009)）からも明らかになっている。しかし、この推定は大まかなものであり、噴出物量をより正確に推定するためには、噴煙内部に含まれる火山灰（礫）の量を直接的に推定する必要がある。噴煙内部の火山灰量を気象レーダーなどのリモートセンシングで推定する際には、大きく 2 つの問題がある。一つは粒径分布が分からないことと、もう一つは水物質の影響である。そのような問題を解決するために期待されている測器の一つが、二重偏波気象レーダーである。

二重偏波気象レーダーは、近年、気象学の分野において目覚ましい発展を遂げてきた。特に、降水量（強度）の高度な推定や、降水粒子判別の分野においては、実用化のフェーズに入りつつある。二重偏波レーダーを火山噴煙の観測に応用する試みは、2000 年三宅島噴火の際に防災科学技術研究所によって行われた（Maki et al. (2001)、Maki and Doviak (2001)、真木・岩波 (2002)）が、その後、約 10 年に渡って、そのような研究プロジェクトは存在しなかった。しかし、世界的には 2010 年のエイヤフィヤトラヨークトル火山噴火を機に、2011 年頃からイタリアやアイスランドで火山噴煙を二重偏波レーダーで観測する取り組みが本格化している。日本では、2010 年から国土交通省 X バンド MP レーダ網（XRAIN・当時の略称）の整備が始まり、桜島局（2011 年～）などで噴火観測事例が蓄積されている。

国内では気象研究所の他に、京都大学防災研究所や鹿児島大学で気象レーダーによる火山噴煙の観測・解析が行われているが、コミュニティの規模が小さいため、十分な事例数の解析が行われているとは言えない。二重偏波レーダーデータによる解析事例を蓄積することで、噴煙内部のダイナミクス・素過程に関する理解を深めていく必要がある。

（気象業務での意義）

Mastin et al. (2009) の関係式は、気象庁の降灰予報及び航空路火山灰情報（VAA）にも用いられている。本研究など、二重偏波レーダーによる火山噴煙による観測・解析が進めば、降灰予報や VAA の予測精度改善のための、基礎となるデータを得ることが出来る。

気象庁では、国内の主要空港に設置している DRAW の更新・二重偏波化を進めており、平成 30 年度までに羽田・成田・関西・那覇の各空港にある DRAW が二重偏波化している。また、全国の降水を監視している一般気象レーダー網については、今年度の東京レーダーを皮切りに、二重偏波化を進めていく計画である。近い将来、鹿児島 DRAW や種子島レーダーが二重偏波化した際に、本研究で培った知識や技術が地方での調査研究・技術開発にも役立つ。

雨灰判別に関しては、火山監視現業への直接的なメリットがある。本研究のような研究が進み、将来的に気象レーダーによる雨灰判別が可能になれば、現業における噴火（噴煙）監視の能力が格段に向上することが期待できる。

研究の目的

本研究の目的は、地方（現業）官署における二重偏波気象レーダーを用いた噴煙解析技術の普及である。また、本研究を通じて、気象レーダーを用いた火山噴煙解析分野（コミュニティ）の裾野拡大・職員のスキルアップも目指す。

研究の目標

気象研究所 X バンド MP レーダー（MRI-XMP）や 2 次元ビデオディストロメーター（2DVD）、国土交通省 XRAIN などの二重偏波レーダーで観測したデータを用いて、桜島などの噴火事例による事例解析を行い、噴煙／火山灰雲エコーと降水エコーの違いについて、とりまとめる。

二重偏波気象レーダーを用いた火山噴煙の解析環境を構築し、その手順をマニュアル化する。

研究成果

（１）成果の概要

二重偏波気象レーダーを用いた火山噴煙の解析環境を構築し、その手順のマニュアル化を行った。解析環境の OS は CentOS7 を、ソフトは気象研究所で開発されたレーダー解析ソフトウェア“Draft”を用いた。

二重偏波レーダーで観測したデータを用いて、桜島などの噴火事例による事例解析を行い、噴煙／火山灰雲エコーと降水エコーの違いについて、とりまとめた。具体的には、晴れの日の噴火事例と曇りの日の噴火事例の事例解析を行った結果、晴れの日と曇りの日で、それぞれ降水エコーとは違う時間変化傾向がみられた。晴れの日の事例では、噴火後時間が経つと反射強度（Z）が弱く、反射因子差（Zdr）が大きくなっていた。降水エコーであれば、弱い降水は Zdr がほぼ 0 になるので、それとは異なっていたことが分かる。この現象は、火山灰が空気抵抗を受けて横長の向きで落下していたために起きたと考えた。一方、曇りの日の事例では Zdr は最終的に 0 に近くなっていたが、偏波間相関係数（ ρ_{hv} ）が若干下がっていたことから、凝集が発生していた可能性があると考えた。 ρ_{hv} は霧雨～弱雨で 1 に近くなることから、こちらも降水エコーとは特徴が異なる。

雨天時の事例についても解析を行い、噴火の発生に伴い、雨雲内部の噴煙に相当する部分の ρ_{hv} が下がっていたことが分かった。

これらの結果は、晴天時／雨天時の噴火検知に資する重要なデータである。

（２）当初計画からの変更点（研究手法の変更点等）

CentOS8 のサポート終了（打ち切り）に対応するため、CentOS7 のインストール及び環境構築を行った。また、2 年目に更新予定だったノート PC の調達が半導体不足の影響で遅れた。そのため、新しい PC での解析が最終年度（3 年目）に入ってからになってしまった。新しい PC については、引き続き、鹿児島地方気象台におけるデータの蓄積・解析に有効活用する予定である。

（３）成果の他の研究への波及状況

本研究で選定した解析事例については、気象研究所経常研究「火山活動の監視・予測に関する研究」副課題 3 「火山噴出物の監視技術とデータ同化に基づく輸送予測」テーマ 1 においても、噴火現象の検知や噴煙に含まれる火山灰等の定量的推定手法の開発のための事例解析の対象とした。

(4) 事前・中間評価の結果の研究への反映状況

(中間評価を実施していないものは事前評価の結果の研究への反映状況)

- 雨と降灰の判別には別途検証が必要であり、二重偏波レーダーのデータで雨と降灰が混ざっている事例でどのように見えるかに集中した方がよい。
→本研究では、桜島上空に雨雲がかかっているときの噴火事例についても解析を行っており、(雨雲に比べて) 偏波間相関係数が下がっていることを確認した。
- 地方共同研究の研究分担者に作業を明示的に示しておく、効率的に進められるのではないかと。発見学習的な要素が強い研究の進め方となっているため、研究の進め方に注意が必要である。
→本地方共同研究は、主として2名の研究分担者(星原・久保)で進めたが、1名(星原)が主に環境構築・プログラム(ρ_{hv} のSNR補正など)を、もう1名(久保)が事例解析・学会発表という形で、作業を分担して進めた。
- 本成果の活用先として、桜島以外の火山への適用も可能であることから、解析結果や解析ツールなどについて積極的にドキュメント化を行い、広く利用されることを目指してもらいたい。
→本研究の目標の一つでもある、二重偏波気象レーダーを用いた火山噴煙の解析環境を構築・手順のマニュアル化を行った。
- 二重偏波レーダーについての知見は防災科学技術研究所や土木研究所も有しているので、気象研究所担当者が知見を整理して地方官署担当者に共有して頂きたい。
→気象研究所担当者によるオンライン講習等を実施することで、知見を整理し、鹿児島地方気象台に共有した。

(5) 今後の課題

本研究では主としてXバンドレーダーによる事例解析を行ったが、Cバンドレーダーである気象庁の一般気象レーダー(種子島レーダー)も二重偏波化された。また、今後、鹿児島空港DRAWの二重偏波への更新も行われる。そのため、今後は気象庁一般気象レーダー・DRAWによる桜島噴火の解析事例も増やしていく必要がある。

自己点検

(1) 到達目標に対する達成度

本研究の到達目標である、噴煙/火山灰雲エコーと降水エコーの違いに関する取りまとめ及び二重偏波気象レーダーを用いた火山噴煙の解析環境を構築・手順のマニュアル化を達成した。それに加え、雨天時の噴火事例解析を行い、噴火検知に資する結果を得るなど、目標を上回る成果を上げた。

(2) 到達目標の設定の妥当性

最終的には到達目標を上回る成果を上げることができたが、桜島の火山活動の状況次第では業務繁忙のため作業を進めることが出来なかった可能性があるため、到達目標は妥当であったと考える。

(3) 研究の効率性(実施体制、研究手法等)について

新型コロナウイルスの感染拡大の影響のため、研究代表者(佐藤)が鹿児島出張を控えていた時期があったが、オンラインによる講習やメール・Teamsによる打ち合わせなどを行うことで、効率的に研究を進めることが出来た。

(4) 成果の施策への活用・学術的意義

今後、一般気象レーダーやDRAWの二重偏波化が進むにつれ、火山監視業務における二重偏波レーダーの重要性は増していくと考えられる。本研究ではそれに先駆けて、解析環境構築のマニュアル化・解析事例の蓄積を行った。これらは将来的に、二重偏波レーダーを使った火山活動の監視・評価の高度化に資すると考える。

学術的な観点からも、二重偏波レーダーを用いた火山噴煙（観測・）解析のプロジェクトは、世界的にもほとんどない。そのような状況の中で、本研究は研究コミュニティの拡大に寄与している。また、二重偏波レーダーという（火山監視としては）先駆的な観測機器のデータを利用し、噴煙内部のダイナミクス・素過程に関する理解を深めることが出来た。

（５）総合評価

本研究の到達目標である、噴煙／火山灰雲エコーと降水エコーの違いに関する取りまとめ及び解析環境構築手順のマニュアル化に加え、雨天時の噴火検知に資する結果を得るなど、目標を上回る成果を上げた。また、本研究の成果は、気象庁内の会議だけではなく、日本地球惑星科学連合大会（JpGU）や火山学会などの学会でも発表を行い、（主として火山研究の）専門家との議論も行うことも出来た。

研究成果リスト

（１）査読論文

なし。

（２）査読論文以外の著作物（翻訳、著書、解説）

なし。

（３）学会等発表

ア．口頭発表

・国際的な会議・学会等

なし。

・国内の会議・学会等（２件）

1. 久保武史，星原一航，小枝智幸，中橋正樹，佐藤英一，二重偏波レーダーを用いた火山噴煙の解析的研究，鹿児島地方気象台 府県気象研究会，2022 年 11 月，鹿児島県鹿児島市
2. 久保武史，星原一航，小枝智幸，中橋正樹，佐藤英一，二重偏波レーダーを用いた火山噴煙の解析的研究，気象庁令和 4 年 12 月合同月検討会，2022 年 12 月，オンライン

イ．ポスター発表

・国際的な会議・学会等

なし。

・国内の会議・学会等

1. 星原一航，久保武史，小枝智幸，中橋正樹，佐藤英一，二重偏波レーダーを用いた火山噴煙の解析的研究（初期解析結果），日本地球惑星科学連合 2022 年大会，2022 年 6 月，千葉県千葉市&オンライン
2. 佐藤英一，二重偏波気象レーダーで観測した 2021 年阿蘇山噴火，日本地球惑星科学連合 2022 年大会，2022 年 6 月，千葉県千葉市&オンライン
3. 久保武史，星原一航，小枝智幸，中橋正樹，佐藤英一，二重偏波レーダーを用いた火山噴煙の解析的研究，日本火山学会 2022 年度秋季大会，2022 年 10 月，オンライン

報道・記事

なし。

その他（（３）「成果の他の研究への波及状況」関連）

なし。

(緊急研究) 集中観測等による線状降水帯の機構解明研究

研究期間：令和3年度～令和4年度

研究代表者：永戸久喜（研究連携戦略官／令和3年度は研究調整官）

課題構成及び研究担当者**(副課題1) 集中観測の実施**

副課題代表者：清野直子（令和3年度／台風・災害気象研究部長）

加藤輝之（令和4年度／台風・災害気象研究部長）

担当研究者：

[気象観測研究部] 瀬古 弘、石元裕史、酒井 哲、吉田 智、小司禎教（令和4年7月からは併任）、西橋政秀（令和4年度5月から）、及川栄治（令和4年度6月から）

[台風・災害気象研究部] 加藤輝之（令和3年度は応用気象研究部）、益子 渉、廣川康隆、小野耕介、荒木健太郎、栃本英伍（令和4年5月から）、末木健太（令和4年5月から）、足立アホロ（令和4年度は併任）、山内 洋（令和4年度）、梅原章仁、永井智広（令和4年度は気象観測研究部に併任）、鶴沼 昂（令和4年度）、佐藤英一（併任）、伊藤享洋（併任）

[気象予報研究部] 林修吾、田尻拓也

(副課題2) 線状降水帯の機構解明・予測技術の向上

副課題代表者：瀬古 弘（気象観測研究部長）

担当研究者：

[気象観測研究部] 瀬古 弘、酒井 哲、吉田 智、小司禎教（令和4年7月からは併任）、岡本幸三、岡部いづみ、川畑拓矢、澤田 謙、幾田泰醇、大泉 伝（令和4年度）、田上雅浩（令和4年5月から）、安井良輔（令和4年5月から）、佐谷 茜（令和4年5月から）、寺崎康児（令和4年6月から）、瀬戸里枝（令和4年9月から）、大塚道子（併任）

[台風・災害気象研究部] 加藤輝之（令和3年度は応用気象研究部）、清野直子（令和4年度は併任）、柳瀬亘、益子 渉、廣川康隆、小野耕介、荒木健太郎、栃本英伍（令和4年5月から）、末木健太（令和4年5月から）、足立アホロ（令和4年度からは併任）山内 洋（令和4年度）、梅原章仁、鶴沼 昂（令和4年度）

[気象予報研究部] 山田雄二（令和3年度）、高槻 靖（令和4年度）、藤田 匡、橋本明弘、林 修吾、渡邊俊一、中川雅之、毛利英明

研究の背景・意義 ※現状と気象研究所の実績、問題点、研究の必要性及び緊急性についても記載

近年の線状降水帯に伴う豪雨による甚大な災害の頻発を受けて、その予測精度向上等に向けた取り組みの加速・強化が喫緊の課題となっている。線状降水帯の発生・停滞・維持等を必要なリードタイムを持って精度よく予測するためには数値予報の精度向上が不可欠であるが、現状では、線状降水帯の降雨分布や降水量に加え、その環境場の予測精度が十分ではない。水蒸気とその流量を始めとして、多種・多様な線状降水帯の発生・停滞・維持等に重要な要素についての定量的な理解がいまだ不十分である。これらは、数値予報モデルの検証・改良や観測データ利用による予測精度向上の妨げとなっている。このため、気象庁観測網の充実に加え、大学や研究機関と連携し、観測の乏しい海上での水蒸気・風の分布、海面からの蒸発など、線状降水帯の発生・停滞・維持等に関する重要な要素を定量的に把握するための観測を行い、各機関が取得したデータを集約・共有することで、様々な事例に対して、線状降水帯の発生・停滞・維持等の機構を解明するための研究を加速化する必要がある。

研究の目的**(全体)**

集中観測等によって線状降水帯の発生・維持機構の解明を加速化するとともに、それら観測データや知見を用いて数値予報の精度向上に繋がるような研究を実施し、線状降水帯の予測精度向上とより早い段階からの確実な防災・減災対策に貢献する。

研究の目標

(全体)

目的を達成するために以下の課題に取り組み、線状降水帯の発生・維持機構の解明の加速化と数値予報の精度向上に貢献する。

- ・大学や研究機関との連携による集中観測の実施と観測データの集約・共有（副課題1）
- ・観測データを用いた線状降水帯の発生・維持機構の解明及びそれら知見も用いた数値予報システムの改善・高度化に関する研究（副課題2）

(副課題1) 集中観測の実施

線状降水帯が多発する梅雨期（6、7月）の九州を中心とした西日本において、気象庁の現行の観測網に加え、既存の研究プロジェクトや共同研究の実施等による大学や研究機関との連携による集中観測を令和4年度に実施する。得られた観測データは同期間の現業観測・数値予報データ等とともに、データベースとしてアーカイブする。データベースに集約されたデータは副課題2での活用に加え、大学や研究機関にも共有することで、線状降水帯の発生・維持機構解明及び予測技術向上に資する研究とその加速化に貢献する。

(副課題2) 線状降水帯の機構解明・予測技術の向上

副課題1で得られた多種多様な観測データを活用し、線状降水帯をより多くの手法で様々な視点から解析し、線状降水帯の発生・維持機構を解明する。さらに、「富岳」等の最先端のスーパーコンピュータを活用し、数値シミュレーションやデータ同化実験を行い、線状降水帯の発生・維持機構の理解の深化を進めるとともに、観測データに加えて上記で得られた知見も活用した数値予報システムの改善・高度化に関する研究を行い、予測精度向上に貢献する。

研究成果

(1) 成果の概要

(全体)

国内の大学や研究機関との連携によりその英知を集め、線状降水帯の機構解明研究を加速化し、予測精度向上に資することを目的として、そのために必要となる気象研究所と各機関との協力関係を記した「線状降水帯の機構解明及び予測技術向上に資する研究の推進に関する協定書」を定めた。本協定には19の大学や研究機関が参加（2023年2月現在）し、協定に基づいて以下の研究を連携して実施した。

まず、6～10月の東シナ海から九州を中心に集中観測を実施し、観測データ等の集約・共有を行った。更に、それらデータも活用した機構解明・予測技術の向上に向けた研究について取り組み、線状降水帯の各種機構に関する一定の知見を得るとともに、観測データ同化を中心とした数値予報技術の研究開発等により数値予報の精度向上に資する成果を得た。

本研究の実施にあたり、気象庁線状降水帯予測精度向上ワーキンググループの下で「線状降水帯の機構解明に関する研究会」を、本研究の副課題2では「線状降水帯の機構解明・予測技術の向上」発表会を、大学や研究機関や庁内関係部署からも参加頂いて、それぞれ定期的に開催し、研究の計画や進捗の報告・共有、機構解明・予測技術向上に向けた議論・意見交換等を積極的に進めた。

(副課題1) 集中観測の実施

- ・2022年6～10月の東シナ海から九州を中心に、14の大学や研究機関と連携して、集中観測（重点観測期間：6月16日～7月15日）を実施した。
- ・気象庁の従来観測網（気象レーダー、ウィンドプロファイラなど）や海洋気象観測船（GNSS水蒸気観測やラジオゾンデ観測を実施）に加え、大学等の練習船・調査研究船、気象庁の通常観測点や臨時の陸上地点で追加のラジオゾンデ観測を行った。また、2022年7月5日には名古屋大学による航空機からのドロップゾンデ観測が行われた。
- ・気象庁の臨時のラジオゾンデ観測に加え、大学や研究機関によるラジオゾンデ、ドロップゾンデ、地上設置型マイクロ波放射計、水蒸気ライダー等の一部の観測データは、リアルタイムで気象庁に送られ現業の数値予報や実況監視に利用された。
- ・鹿児島大学、長崎大学、三重大学の3船合同による東シナ海での稠密観測の結果を用いた解析により、海面水温の前線による下層大気の気温・風速場の変化が、大雨をもたらす積乱雲の発生に大きく影響する可能性が分かってきた。

- ・山口大学による線状降水帯を構成する積乱雲中の降水粒子を直接撮影可能な新しいビデオゾンデ（Rainscope）を用いた観測では、1事例に限られたものの、初期解析に成功した。
- ・2022年7月5日の高知県での線状降水帯発生時の海面からの潜熱フラックスを調査し、東シナ海から四国沖に流れる黒潮に沿って潜熱フラックスの極大値がみられ、台風の影響がなかった6月後半の平均との差と比較して、線状降水帯発生期には近海での潜熱フラックスがかなり大きいことが分かった。また、風上側にある南大東島でのラジオゾンデ観測では、高度1km以下の下層水蒸気の蓄積がみられなかったことから、南大東島付近から四国沖にかけて大気下層への水蒸気蓄積が示唆された。
- ・西日本を中心に17地点に地上設置型マイクロ波放射計を整備しており、年度内に整備完了・観測開始の予定で作業を進めている。整備済みの観測点からのデータは気象庁にリアルタイムで送られ、現業の実況監視や試験運用の数値予報に利用された。
- ・東シナ海において、気象観測用ドローンを用いた洋上観測を行い、風速やうねり等の安全に観測する条件を調べるとともに、高度500mまでの気温や湿度、水平風の鉛直分布を得た。
- ・既存の気象庁現業観測および数値予報資料に加え、観測で取得したデータを集約し、大学や研究機関と共有することで、線状降水帯の研究を推進するためのデータベースを整備した。

（副課題2）線状降水帯の機構説明・予測技術の向上

線状降水帯の機構説明

- ・今出水期に発生した線状降水帯の発生環境場を調査した。各事例の特徴として、対流有効位置エネルギーが2000 J kg⁻¹程度と顕著に不安定な場ではあったが、水蒸気フラックス量や大規模場の上昇流、可降水量などは事例毎に大きく異なっていた。2022年7月18日の長崎県対馬や山口県・福岡県の事例については水蒸気フラックスや可降水量などが極めて大きく、線状降水帯の発生に好都合な場であった。
- ・2022年8月3～4日にかけて山形県・新潟県で発生した線状降水帯等に伴う集中豪雨の発生環境場を詳細に調査した。集中豪雨発生期間中、東北沖に停滞した低気圧とその南側の西～南西よりの風が収束場を形成し、集中豪雨発生域への水蒸気流入を強化していた。また、過去の類似事例との比較を行い、今回の事例では、特に大気下層の極めて顕著な暖湿気の流入が重要であることがわかった。
- ・2021年7月10日に九州南部に大雨をもたらした線状の降水システムについて水平解像度250mの数値シミュレーションを行い、線状の降水システムの組織化についてコールドプールや鉛直シアの関係に着目して解析を行った。その結果、コールドプールは線状の降水システムの組織化に重要であるが、コールドプールが強過ぎると降水システムは幅の広い構造になるとともに対流の発達に阻害されることが分かった。これらの降水システムの構造や発達は、鉛直シアとコールドプールの強さのバランス関係に依存していることが分かった。
- ・2021年8月13～14日に九州北部で大雨をもたらした降水系に対する降水効率の影響について調べた。降水効率は単一の積乱雲よりも高く、雨滴の中央粒径が大きいと同時にその数濃度が高い状態となることで、地上で解析される降水強度が結果として大きくなることを示唆された。
- ・2022年7月12日に埼玉県鳩山町で生じた大雨事例について降雨の強化過程を粒径分布の観点から調べた。地上の粒径分布の特徴から、粒径分布の平衡状態を確認した。平衡状態に至る過程では、粒径分布の裾野での頻度が時間とともに増加し、その変化が鉛直方向の変化と連動することで、降雨の強さに反映されていることが分かった。
- ・2022年6月25日に熊本県を中心に大雨をもたらした降水系を対象に、Rainscope観測データを用いて脊振山レーダーによる降水粒子判別手法の判別精度を確認した。その結果、これまで“混合相”と判別していたカテゴリに表面の湿った霰が含まれること、“雪（強）”と判別していたカテゴリに実際には粒子サイズの小さな霰も多く含まれることが判明し、既存の降水粒子判別手法における改善点を明らかにした。
- ・2022年2月20日に水戸で実施されたRainscope試験観測で捉えられた降水粒子の特徴を、数値シミュレーションで概ね再現することができた。さらに、茨城県上空の層状降水域でRainscopeが捉えた雲粒付き雪粒子の生成には、茨城県沖の対流性降水域から供給された過冷却雲粒が寄与していたことが分かった。Rainscope観測と数値モデルの連携によって降水機構説明に資する知見が得られることを示した。

- ・地上設置型マイクロ波放射計を用いた水蒸気・気温の高度分布推定手法（鉛直1次元変分法データ同化(1DVAR)）を開発し、整備中のマイクロ波放射計に適用した。名瀬の2022年7～8月のゾンデデータでこの手法の検証を行ったところ、数値モデルや従来手法のニューラルネットワークよりも高精度であることを確認した。この手法を用いて2022年7月の名瀬における降水事例の環境場の変動を解析したところ、降水の発生3～12時間前から急激に大気の状態が不安定化しており、これは高度1km以下の大気下層で水蒸気フラックス量が増大した結果、大気下層での水蒸気量が増加したためであることがわかった。
- ・線状降水帯の発生に大きく影響する水蒸気の蒸発起源域とその移流経路に関する情報を引き出すため、水蒸気同位体データ同化システムを開発している。今年度は、赤外線大気サウンディング干渉計による観測を想定した水蒸気量と水蒸気同位体比の疑似観測データを作成し、それによる理想化実験をNICAM-WISO（NICAM（非静力学正20面体格子大気モデル）に水同位体比に関する過程を組み込んだモデル）を用いて行った。従来観測に衛星観測された水蒸気量や同位体比を追加で同化することで、観測の空白な地域を中心に水蒸気量に加えて気温や風速の精度が向上することがわかった。水蒸気同位体データが線状降水帯発生に関わる水蒸気の蒸発起源や移流経路を特定するために有効な観測データとなる可能性が得られた。

数値予報技術の高度化

- ・地上設置型マイクロ波放射計で観測した可降水量や1DVARで得られた温度や湿度の鉛直プロファイル、輝度温度について、気象研究所メソNAPEX（数値解析予報実験システム）を用いて同化実験を行った。可降水量や温度・湿度の鉛直プロファイルを同化すると予測精度が改善することを確認した。輝度温度を2分間隔の頻度で直接同化するとさらに予測精度が改善することを確認した。
- ・マイクロレインレーダーとディストロメータを利用し、雲微物理スキームの検証を行った。新たに開発した2峰性の雨滴粒径分布を雲微物理スキームに実装することで、反射強度の鉛直プロファイルの予測が観測に近づくことを確認した。
- ・水蒸気ライダーで得られた水蒸気鉛直プロファイルデータの同化により、大気下層の水蒸気場の解析値・予報値が共に改善することを確認した。また、2021年7月10日に鹿児島県北西部で発生した線状降水帯事例に関して、水蒸気ライダーデータの同化により、降水域の予測精度が改善することが分かった。
- ・豪雨の上流側の東シナ海上での洋上ドローン観測で得られた温度と湿度、水平風について、気象研究所メソNAPEXを用いて同化実験を行った。それらのデータを用いることにより、降水予報の予測精度が改善する事例があることを確認した。
- ・「富岳」上に構築した1000メンバーによるLETKF（局所アンサンブル変換カルマンフィルタ）解析予報システムによって、2022年7月18日から19日にかけて九州や中国地方で発生した線状降水帯の予測可能性の調査を実施し、半日程度前から豪雨発生の可能性を示した。
- ・2022年7月の豪雨事例について、衛星大気追跡風、ドップラー速度の高頻度高密度利用のメソスケール解析システムでのインパクトを調査した。衛星大気追跡風は上空トラフの位相や深まりの改善、ドップラー速度は下層シア強化により強雨の表現向上に寄与した。両者共に高頻度高密度化すると改善が大きく、大きいスケールの場の精度向上で小さいスケールのインパクトも得られやすくなることが示唆された。
- ・アンサンブルベースのメソスケール解析システムに都市効果を組み入れた地表面過程スキームを導入し高密度地上観測データを同化することで、地上付近の気温場・水蒸気場の推定精度が向上し対流の立ち上がりや降水域の予測精度が向上することがわかった。
- ・気象庁全球モデルの積雲対流スキームにMalardel and Bechtold (2019) およびこれを拡張した手法を導入してフィードバック部分をグレーゾーンに対応させ、2018年8月5日に東北地方で発生した線状降水帯事例について、水平格子間隔約10kmでの予測実験を行った。強雨の表現の差は小さく、予測精度を改善するためにはさらなるモデルの改良が必要であることがわかった。
- ・LES (Large Eddy Simulation) 実験を用いた線状降水帯の理想化実験の分析を進めた。LESの結果を空間フィルタで平滑化し、フラックスをフィルタースケールとサブフィルタースケールに分解した。フィルタースケールの値から物理過程パラメタリゼーションによりサブフィルタースケールのフラックスを診断した結果との比較を行った。解像度に応じた雲乱流の物理過程パラメタリゼーションに向けて、サブフィルタースケール輸送のスケール相似則に基づいた近似を検討した。スケール相似則に基づく新たな定式化が、より精度よくサブフィルタースケールの輸送を表現することがわかった。

- ・風洞実験装置に新たに整備されたステレオ PIV 風速計を用いて予備的実験を行い、乱流の風速分布を立体的に測定できることを確認した。
- ・風洞実験と露場観測から得られた既存のデータに基づき、地表面フラックス評価の精緻化を行った。

(2) 当初計画からの変更点（研究手法の変更点等）

「(副課題 2) 線状降水帯の機構解明・予測技術の向上」の「(b) 数値予報技術の高度化」における「風洞実験を活用した数値予報モデルの接地境界層過程の改善」について、世界的な電子部品不足により大型風洞装置の改修工事に遅れが生じたため、まずは既存のデータを用いて改善策の検討を進めることとした

「(副課題 1) 集中観測の実施」の「(c) 線状降水帯の機構解明のための次世代水蒸気ライダーの精度改善」は、科研費の課題内で実施することとした。

(3) 成果の他の研究への波及状況

本研究における各種取組は、関連する経常研究課題と密接な関連があり、それら課題におけるこれまでの取組によって得られた成果や技術が基盤となっている。このため、本研究で得られた成果や技術は、今後の課題と共に関連する経常研究課題に引き継がれ、それを基に更なる研究開発が実施される予定である。

(4) 事前・中間評価の結果の研究への反映状況

(中間評価を実施していないものは事前評価の結果の研究への反映状況)

事前評価では、集中観測における効果的なデータの効率的な取得と研究への最大限の活用が可能となるように、本研究担当者及び本庁等との連携、課題間の連携を図るべき、との意見があった。このため、観測の計画・準備段階から観測期間中にかけて、所内関係者・庁内関係部局・観測参加機関と様々な機会や手段を用いて密な情報共有と意見交換を実施するとともに、各機関に対して早い段階から観測データの共有の呼びかけを行い、データベース装置への集約・共有を進めた。

また、観測や機構解明等については本研究終了後も継続すべき、との意見があった。このため、今後も、関連する経常研究課題をベースとして、大学や研究機関とも連携し、観測や機構解明等を継続して実施する予定である。

(5) 今後の課題

本研究課題は今年度で終了となるが、線状降水帯の発生要因となる現象は、低気圧、前線、台風等様々であり、これらの現象毎に必要な条件を詳細に調査するためには更なる観測が必要であることから、今後も、共同研究や各種プロジェクトによる連携も視野に、大学や研究機関との協力による観測の実施を目指す。

また、大学や研究機関への機構解明研究参画の呼び掛けを継続するとともに、経常研究課題をベースに機構解明・予測技術向上に向けた研究を更に進展させ、線状降水帯の発生・停滞・維持等の機構に関する知見の蓄積や数値予報技術向上に繋がるような研究成果の創出を目指す。さらに、大学や研究機関の研究者との議論も踏まえ、研究成果を数値予報の精度向上に繋げる手法の明確化を進めて行きたい。

自己点検

(1) 到達目標に対する達成度

(副課題 1) 集中観測の実施

集中観測については、所内での観測機器・機材等の調達を始めとする観測とその実施に係る各種対応を行うとともに、庁内関係部局や大学や研究機関との連携により、概ね予定していた観測を無事を実施することができた。観測データは各機関によって解析が進められるとともに、気象庁の現業観測・数値予報データとともにデータベース装置に順次集約・共有されて、機構解明・予測技術向上に向けた研究にも活用されている。更に、ラジオゾンデやドロップゾンデ、地上設置型マイクロ波放射計や水蒸気ライダー等の一部の観測データは、リアルタイムで気象庁に送られ現業の数値予報や実況監視に利用された。引き続き、集中観測データの更なる集約・共有と利活用の推進は必要となるものの、概ね目標は達成されたと考える。

(副課題2) 線状降水帯の機構解明・予測技術の向上

機構解明については、集中観測データや現業観測・数値予報データを用いて、今年度に発生した線状降水帯等の大雨事例について解析を行うとともに、過去事例についても解析を行い、線状降水帯等の大雨をもたらす降水システムの環境場や内部構造に関する知見の蓄積を進めた。予測技術の向上については、地上設置型マイクロ波放射計、水蒸気ライダー、ドローン等の観測データについて、気象庁の現業メソ数値予報システムと同等のシステムを用いたデータ同化実験を行い、予測精度改善に資する結果を得た。特に、地上設置型マイクロ波放射計については、当初想定より早期に開発を進め、輝度温度の直接同化や高頻度利用等の高度利用の手法により更なる精度改善の可能性を示した。今後、機構解明については更なる事例解析と知見の蓄積を進め、予測技術向上については観測データ利用についてより多くの事例・期間での検証や手法の更なる高度化等を行う。今後に向けた課題はあるが、特に後者については、数値予報の予測精度向上に資する可能性を示したことで、目標達成に向けた着実な成果が得られたと考える。

(2) 到達目標の設定の妥当性

副課題1、2ともに、目標達成もしくはそれに向けた着実な成果が得られたことから、目標の設定は概ね妥当だったと考える。一方で、副課題2については機構解明・予測技術の向上で得られた成果を、最終的な数値予報の予測精度向上に繋げるためには更なる取り組みを続けていく必要があり、研究期間が1年あまりの本研究としては、最終的な目的を視野に入れた段階的な目標を設定しておくことも必要だったと考える。

(3) 研究の効率性（実施体制、研究手法等）について

副課題1については、連携して観測を行った各機関がそれぞれのプロジェクト等に基づいて、得意とする手法を用いた観測を実施することで、全体として効果的・効率的な観測を実施することができた。

副課題2については、大学や研究機関との連携や、各研究部がそれぞれ専門とする内容に対応する研究項目を分担して実施する形で、必要となる幅広い研究項目を様々な手法を用いて効果的・効率的にカバーすることができた。

(4) 成果の施策への活用・学術的意義

集中観測については、ラジオゾンデやドロップゾンデ、地上設置型マイクロ波放射計や水蒸気ライダー等の一部の観測データは、リアルタイムで気象庁に送られ現業の数値予報や実況監視に利用された。また、各種観測データ同化を中心とした数値予報技術に関する研究開発成果は、現業数値予報の予測精度向上に資する可能性を示した。更には、線状降水帯の機構解明という観点で、本研究で得られた各種知見は学術的な進展に寄与するものといえる。

(5) 総合評価

庁内関係部局・大学や研究機関との連携による集中観測を実施し、観測データ等の集約・共有を行った。更に、それらデータも活用した機構解明・予測技術の向上に向けた研究についても大学や研究機関との連携により取り組み、線状降水帯の各種機構に関する一定の知見を得るとともに、観測データ同化を中心とした数値予報技術の研究開発等により数値予報の精度向上に資する成果を得た。本研究では、気象研究所が中心となり、多数の大学や研究機関との協力の下、日本の英知を集める形で研究を遂行したことで、気象研究所の社会的貢献を示すことができた。また、本研究で構築した所内横断的な研究体制と得られた成果は、引き続き、気象研究所としての重要課題である線状降水帯の機構解明と予測技術向上に向けた研究を遂行していく上での基盤となるものである。以上により、本研究が1年余りの研究期間で実施されたことも鑑みると、十分な成果を上げたと考えられる。

参考資料

研究成果リスト

(1) 査読論文

1. Hirockawa, Y., and T. Kato, 2022: Improvements of procedures for identifying and classifying heavy rainfall areas of linear-stationary type. *SOLA*, **18**, 167-172.

2. Satoru Yoshida, Tetsu Sakai, Tomohiro Nagai, Yasutaka Ikuta, Yoshinori Shoji, Hiromu Seko, Koichi Shiraishi, 2022: Lidar observations and data assimilation of low-level moist inflows causing severe local rainfall associated with a mesoscale convective system. *Monthly Weather Review*, Vol. **150**, No. 7, 1781-1798.
3. 吉田 智, 2022: 水蒸気ライダー観測とデータ同化による線状降水帯に伴う降水量予測精度の向上. *計測と制御*, **61**, 372-376.
4. Kobayashi, K., L. Duc, T. Kawabata, A. Tamura, T. Oizumi, K. Saito, D. Nohara, T. Sumi, 2023: Ensemble rainfall-runoff and inundation simulations using 100 and 1000 member rainfalls by 4D LETKF on Kumagawa River flooding 2020, PEPS (accepted).
5. Sawada, K., N. Seino, T. Kawabata, and H. Seko, 2023: Impacts of an Urban Canopy Scheme and Surface Observation Data on a Heavy Rain Event through Data Assimilation, *SOLA* (accepted).

(2) 査読論文以外の著作物（翻訳、著書、解説）

なし。

(3) 学会等発表

ア. 口頭発表

・国際的な会議・学会等

なし。

・国内の会議・学会等

1. 荒木健太郎, 瀬古 弘, 石元裕史, 田尻拓也, 山内 洋, 吉本浩一, 松元 誠, 竹田智博, 河野宜幸, 鈴木健司, 中山和正, 地上マイクロ波放射計ネットワークの構築と初期観測, 日本気象学会 2022 年秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
2. 荒木健太郎, 瀬古 弘, 石元裕史, 田尻拓也, 山内 洋, 吉本浩一, 松元 誠, 竹田智博, 河野宜幸, 鈴木健司, 中山和正, 地上マイクロ波放射計ネットワークの構築と初期観測, 線状降水帯の機構解明に関する研究会 (第 6 回), 2022 年 11 月, オンライン
3. 幾田泰醇, 瀬古 弘, 川畑拓矢, 清水慎吾, 地上設置型マイクロ波放射計輝度温度の 4 次元同化, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
4. 幾田泰醇, 瀬古 弘, 川畑拓矢, 石元裕史, 荒木健太郎, 田尻拓也, 清水慎吾, 吉本浩一, 竹田智博, 河野宜幸, 松元 誠, 鈴木健司, 中山和正, 地上設置型マイクロ放射計データ同化のインパクト, 線状降水帯の機構解明に関する研究会 (第 6 回), 2022 年 11 月, オンライン
5. 鶴沼 昂, 降雨の強化過程と粒径分布パラメータ推定精度の検証, 「線状降水帯の機構解明・予測技術の向上」発表会, 2022 年 12 月, オンライン
6. 永戸久喜, 「集中観測等による線状降水帯の機構解明研究」について, 線状降水帯の機構解明に関する研究会 (第 1 回), 2022 年 2 月, オンライン
7. 永戸久喜, 集中観測等による線状降水帯の機構解明に関する緊急研究, 令和 4 年度「気象庁施設等機関研究報告会」, 2023 年 2 月, 東京
8. 加藤輝之, 集中観測の実施状況の概要について, 線状降水帯の機構解明に関する研究会 (第 5 回), 2022 年 9 月, オンライン
9. 加藤輝之, 集中観測実施計画と観測データ・数値予報資料の共有 (線状降水帯データベース), 線状降水帯の機構解明に関する研究会 (第 4 回), 2022 年 6 月, オンライン
10. 加藤輝之, 線状降水帯研究に関するレビューと課題, 線状降水帯の機構解明に関する研究会 (第 1 回), 2022 年 2 月, オンライン
11. 加藤輝之, 永戸久喜, 瀬古 弘, 清野直子, 立花義裕, 中村啓彦, 滝川哲太郎, 瀬戸心太, 吉田 聡, 藤田実季子, 小松幸生, 山田広幸, 鈴木賢士, 清水慎吾, 坪木和久, 白石浩一, 川村誠治, 北井信則, 久保田拓志, 2022 年梅雨期線状降水帯集中観測の概要, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市

12. 川畑拓矢, 線状降水帯を知るーそのメカニズムと予測についてー, 第2回 スーパーコンピューター「富岳」成果創出加速プログラム シンポジウム「富岳百景」, 2022年12月, オンライン
13. 酒井 哲, 瀬古 弘, 山内 洋, 佐藤英一, 足立アホロ, 吉田 智, 永井智広, 小司教禎, つくばにおけるラマンライダーとドローンによる水蒸気鉛直分布の比較観測, 第40回 レーザーセンシングシンポジウム, 2022年9月, 福山市
14. 末木健太, 線状降水帯を発生させる降水セル群の移動と降水強度変化の解析, 「線状降水帯の停滞メカニズムおよびその環境場形成に寄与する大気擾乱の階層構造の解明」に関する研究会, 2022年12月, 仙台市
15. 末木健太, 令和4年7月4～5日の高知の線状降水帯に関する事例解析, 数値予報事例検討会, 2023年1月, 東京
16. 末木健太, 令和4年7月に高知で発生した線状降水帯のサブキロメートル解像度再現実験, 「線状降水帯の機構解明・予測技術の向上」発表会, 2023年2月, オンライン
17. 瀬古 弘, マイクロ放射計と洋上ドローンの同化実験, 「線状降水帯の機構解明・予測技術の向上」発表会, 2023年2月, オンライン
18. 立花義裕, 春日 悟, 万田敦昌, 山中晴名, 中村啓彦, 仁科文子, 加古真一郎, 滝川哲太郎, 安藤雄太, 西川はつみ, 加藤輝之, 清野直子, 榎本 剛, 吉田 聡, 藤田実季子, 野中正見, 黒潮 SST 前線近傍で実施した梅雨前線の三隻同期大気海洋格子点移動観測, 日本気象学会 2022年度秋季大会, 2022年10月, 札幌市
19. 栃本英伍, 令和2年7月4日に九州南部で豪雨を生じた梅雨前線低気圧への上層トラフの影響, 線状降水帯の機構解明に関する研究会(第4回), 2022年6月, オンライン
20. 栃本英伍, 末木健太, 廣川康隆, 益子 渉, 新野 宏, 線状降水帯発生環境場における Entrainment を考慮した CAPE の特徴, 日本気象学会秋季大会, 2022年10月, 札幌市
21. 栃本英伍, 廣川康隆, 2022年8月3日に山形・新潟で発生した集中豪雨に関わる循環場および環境場について, 線状降水帯の機構解明に関する研究会(第6回), 2022年11月, オンライン
22. 栃本英伍, 2022年8月3日に山形・新潟で発生した線状降水帯に関わる循環場および環境場について, 「線状降水帯の機構解明・予測技術の向上」発表会, 2022年12月, オンライン
23. 寺崎康児, 大アンサンブルを用いた線状降水帯の予測精度に関する研究, 「線状降水帯の機構解明・予測技術の向上」発表会, 2023年2月, オンライン
24. 橋本明弘, 鈴木賢士, 梅原章仁, Rainscope ゾンデ観測と数値モデルによる降水形成機構解明, 第18回ヤマセ研究会, 2023年3月, 仙台市
25. 廣川康隆, 加藤輝之, 新野 宏, 1989～2021年に生じた線状降水帯の出現頻度の特徴, 日本気象学会 2022年秋季大会, 2022年10月, 札幌市
26. 廣川康隆, 栃本英伍, 今出水期に発生した線状降水帯事例と発生環境場の概要, 線状降水帯の機構解明に関する研究会(第5回), 2022年9月, オンライン
27. 藤田 匡, 瀬古 弘, 川畑拓矢, 岡本幸三, ドップラー速度、AMV 同化の検討, 「線状降水帯の機構解明・予測技術の向上」発表会, 2022年12月, オンライン
28. 益子 渉, 2021年7月10日に九州南部に大雨をもたらした降水システムの内部構造と発達・維持機構, 「線状降水帯の停滞メカニズムおよびその環境場形成に寄与する大気擾乱の階層構造の解明」に関する研究会, 2022年12月, 仙台市
29. 益子 渉, 2021年7月10日に九州南部に大雨をもたらした降水システムの発達・維持機構, 「線状降水帯の機構解明・予測技術の向上」発表会, 2022年11月, オンライン
30. 益子 渉, 2021年7月10日に九州南部に大雨をもたらした降水システムの特徴(第2報), 日本気象学会 2022年秋季大会, 2022年10月, 札幌市
31. 山崎優菜, 滝川哲太郎, 柄池大輔, 立花義裕, 万田敦昌, 春日 悟, 山中晴名, 中村啓彦, 仁科文子, 西川はつみ, 安藤雄太, 榎本 剛, 吉田 聡, 加藤輝之, 3船格子ラジオゾンデ観測から見積もられた水蒸気フラックスと降雨の関係, hotspot 2 研究集会, 2023年3月, 福岡市

32. 山田広幸, 伊藤耕介, 平野創一郎, 篠田太郎, 坪木和久, 林 昌宏, 和田章義, 加藤輝之, 梅雨前線における低圧場の形成と対流圏上層の北風との関係, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
33. 吉田 聡, 石井 智, 泉 智貴, 宮 湛秋, 澤田尚樹, 成田愛子, 藤田実季子, 川合義美, 加藤輝之, 小松幸生, 新青丸 KS-22-9 航海による東シナ海黒潮横断観測, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
34. 吉田 智, 2022 年の水蒸気ライダーデータのゾンデ比較とデータ同化、「線状降水帯の機構解明・予測技術の向上」発表会, 2023 年 2 月, オンライン
35. 渡邊俊一, 伊藤純至, LES を用いた対流雲内のサブグリッド輸送の検討, 非静力学モデルに関するワークショップ, 2022 年 12 月, つくば市

イ. ポスター発表

・国際的な会議・学会等

なし。

・国内の会議・学会等

1. 鵜沼 昂, 山内 洋, 梅原章仁, 加藤輝之, 2021 年 8 月 13~14 日に九州北部で大雨をもたらした降水系の降水の強さに関する二重偏波レーダーを用いた解析, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
2. 瀬古 弘, 足立アホロ, 梅原章仁, 佐藤英一, 小司禎教, 酒井 哲, 吉田 智, 線状降水帯の降水予報精度向上を目指した気象観測用ドローンを併用した水蒸気観測, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, 東京
3. 瀬古 弘, 山内 洋, 梅原章仁, 佐藤英一, 酒井 哲, 足立アホロ, 福岡レーダーによる屈折率推定とドローン観測, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
4. 瀬古 弘, 幾田泰醇, 川畑拓矢, 石元裕史, 荒木健太郎, 田尻拓也, 清水慎吾, 吉本浩一, 竹田智博, 河野宜幸, 松元 誠, 鈴木健司, 中山和正, メソ NAPEX を用いた地上マイクロ波放射計可降水量の同化実験, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月, 札幌市
5. 益子 渉, 2021 年 7 月 10 日に九州南部に大雨をもたらした降水システムの特徴, 日本気象学会 2022 年度春季大会, 2022 年 5 月, 東京
6. 万田敦昌, 春日 悟, 山中晴名, 立花義裕, 中村啓彦, 滝川哲太郎, 仁科文子, 西川はつみ, 安藤雄太, 加藤輝之, 榎本 剛, 吉田 聡, 飯塚 聡, 森井康宏, 青島 隆, 2022 年 6 月に東シナ海上で実施された高層気象観測で検出された湿潤絶対不安定層, 2022 年度日本海洋学会秋季研究発表大会, 2022 年 9 月, 名古屋市

報道・記事

1. 藤原弘章「線状降水帯」予測情報、きょうから開始 精度向上へ集中観測も, 朝日新聞, 2022 年 6 月 1 日
2. 川畑拓矢, かんさい情報ネット ten. 「不可能を可能に…同じ場所に長時間大雨が降り続く「線状降水帯」予測の現在地と課題」, 読売テレビ, 2022 年 6 月 28 日
3. 川畑拓矢, ウェークアップ「進歩・データで「線状降水帯」予測「富岳」で精度向上」, 日本テレビ, 2022 年 7 月 2 日
4. 川畑拓矢, 情報ライブ ミヤネ屋「独自・線状降水帯“大気の川”影響・気象庁の「観測・予測体制」は」, 日本テレビ, 2022 年 7 月 5 日
5. 加藤輝之, スーパーJ チャンネル「調査船に密着取材 見えてきた線状降水帯の発生メカニズム カギは黒潮に…」, テレビ朝日, 2022 年 7 月 20 日
6. 加藤輝之, 「線状降水帯」めぐりデータベースを整備 気象庁」, テレビ朝日, 2022 年 10 月 25 日

その他（「成果の他の研究への波及状況」関連）

なし。