

2. 研究報告

2. 1. 研究課題

本節には、気象研究所が令和2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。

経常的に実施する研究

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2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
南海トラフ沿いのプレート間固着状態監視と津波地震の発生状況即時把握に関する研究	H28～R2	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2年度は、次の5課題を実施した。

研究課題	研究期間	実施官署	担当研究部
機械学習を用いた地震波検測に関する研究	R1～R2	大阪管区気象台	地震津波研究部
全天カメラによる雲の地上観測システムの開発	R2～R3	大阪管区気象台	気象観測研究部
沖縄地方の低周波地震の震源決定と発生状況等の調査	R2～R3	沖縄気象台	地震津波研究部
高精度な津波数値計算結果を用いた津波の地域特性の理解	R2～R3	仙台管区気象台、大阪管区気象台、高知地方気象台、石垣島地方気象台	地震津波研究部
二重偏波レーダーを用いた火山噴煙の解析的研究	R2～R4	鹿児島地方気象台	火山研究部

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2年度の実施課題はなかった。

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2年度は、次の5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
民間航空機による温室効果ガスの3次元長期観測とデータ提供システムの構築	H28～R2
光吸収性エアロゾルの監視と大気・雪氷系の放射収支への影響評価 ー地球規模で進行する雪氷圏融解メカニズムの解明に向けてー	H29～R3
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	R1～R5

(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
人工放射性核種のバックグラウンド大気監視と数値解析に関する研究	R2

(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～R4

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2年度は、次の61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
統合的気候モデル高度化プログラム	統合的気候変動予測	気象業務支援センター
	気候モデルを用いた気候変動再現実験のマルチモデル比較	東京大学大気海洋研究所
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)	「FishTech 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する共同研究	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
気象レーダーを活用した火山噴煙に関する研究	鹿児島大学
衛星搭載ドップラー風ライダの開発・利用に関する研究	東京都立大学
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
地形が大気境界層における拡散現象に及ぼす影響の研究	龍谷大学
フェーズドアレイ気象レーダーによる顕著現象の探知に関する基礎研究	情報通信研究機構
GNSS データと地震計データを用いた断層すべり推定に関する研究	国土地理院
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

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
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
プレート境界の海底地震活動に関する共同研究	東海大学
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
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
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
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
バイオエアロゾル放出源を考慮したエアロゾルモデルの高度化	茨城大学、国立環境研究所
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
台風解析・予報の高度化に資する台風発生の環境要因の解析及びメカニズム推定	横浜国立大学、気象庁大気海洋部
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	東日本旅客鉄道株式会社
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
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
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
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
積雪地域における雲の放射影響の研究	北見工業大学
領域モデルを用いた長期再解析に関する研究	東北大学
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
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
南鳥島における二酸化炭素鉛直平均濃度観測	東京大学
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
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
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
筑波山頂におけるエアロゾル数濃度変動の実態把握と原因解明に関する研究	筑波大学
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	電子航法研究所

利用のための研究	
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
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、沖縄気象台
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
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
台風の移動の診断的評価	岐阜大学
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の共同研究	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	東京大学、気象庁情報基盤部
メソアンサンブル予報を用いた太陽光発電出力予測に関する研究	産業技術総合研究所、気象庁予報部
二重偏波レーダーデータを利用した雷の直前予測技術の開発に関する共同研究	東京都立大学
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、富山大学
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	名古屋大学、気象庁大気海洋部
海洋モデルの高精度化による気候変動予測の向上に関する研究	東京大学、九州大学、海洋研究開発機構
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
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
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
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
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
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	産業技術総合研究所、 日本大学、気象庁情報基盤部
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

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2年度は、次の36件の研究を実施した。

相手機関	共同利用区分	課題名	期間
北海道大学 低温科学研究所	共同研究	海氷アルベドの変動要因の解明と海氷アルベド物理モデルの開発	R2
		現地観測と数値モデルの統合活用による札幌の雪氷汚染の実態解明	R2
東北大学 災害科学国際研究所	共同研究	津波統合モデルを用いたマルチシナリオハザード評価手法の確立	R2
		蔵王・御釜における水・熱・化学物質収支から見た地下水流動系の解明	R2
東北大学 東北アジア研究センター	共同研究	蔵王山・御釜火口の活動調査	R2
新潟大学 災害・復興科学研究所	共同研究	日本海側地域に災害をもたらす極端気象のマルチスケール相互作用	R2
宇宙航空研究開発機構・国立環境研究所・環境省	共同研究 (第2回温室効果ガス観測技術衛星シリーズ研究公募)	地上全天型天空輝度計のデータ処理アルゴリズムの開発・検証および GOSAT シリーズの雲・大気エアロゾルプロダクトの検証	R2
宇宙航空研究開発機構	共同研究 (第2回地球観測研究公募)	GCOM-C 大気プロダクト評価のための検証データの取得と提供	R1~R3
		全球データ同化システムを用いた、衛星シミュレータ及び衛星同化の検証と改良	R1~R3
		GCOM-C SGLI エアロゾルプロダクトを用いたエアロゾルデータ同化予測システムの構築と検証	R1~R3
		複合衛星データを用いた火山灰アルゴリズムの開発	R1~R3
	共同研究 (ALOS-2 第6回研究公募)	干渉SAR手法を用いたプレート間固着による定常的な地殻変動の検出	H28~R2
筑波大学 つくば産学連携強化プロジェクト	共同研究	季節予報の社会実装に向けた 2019/2020 大暖冬の要因解明	R2
東京大学 地震研究所	一般共同研究	伊豆大島火山マグマ活動の解明に向けた精密重力観測	R2

東京大学 地震研究所 地震・火山噴火予 知研究協議会		断層の内部状態の解明	R2
	特定共同研究	精密地球物理観測ネットワークによる地殻活動の総合的な理解	R2
		SAR を用いた多角的な地殻・地表変動研究	R2
		固体地球現象の理解と予測に向けたデータ同化法の開発	R2
		地球深部の構造とダイナミクス	R2
	大型計算機共同利用公募研究(戦略的公募研究)	津波即時予測技術の共進化を可能にする標準評価法とデータセットの創出	R2
公募研究	マグマ起源物質の地球化学的モニタリングによる火山性流体挙動解明および火山活動評価	R2	
東京大学地震研究所・京都大学防災研究所	拠点間連携共同研究	建物の応答を考慮した高精度地震情報配信手法の開発	R2
東京大学 大気海洋研究所	特定共同研究	「世界海洋大循環モデルの相互比較」 分担課題「大気海洋研究所および気象研究所の世界海洋大循環モデルの相互比較」	R2
	学際連携研究 「一般共同研究」	海氷モデル力学パラメータに対する観測・理論・数値的要請の融合	R2
	研究船共同利用	2018 年台風 24 号通過時に駿河湾富士川河口扇状地で発生したと考えられる混濁流の解明	R2
統計数理研究所	一般研究	データ同化システムにおける誤差情報の高度利用に関する研究 (3)	R2
		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	R2
情報・システム研究機構 データサイエンス共同利用基盤施設	一般共同研究	Ensemble Kalman Inversion を用いた洪水確率予測の最適化	R2
東京工芸大学 風工学研究拠点	共同研究・共同利用	日本版竜巻スケールおよびその評価手法に関する研究	R2

国立極地研究所	共同研究	両極由来の寒気に伴う顕著大気現象発現にかかわる極域－熱帯域大気海洋結合システムの解明	R1～R3
京都大学 生存圏研究所	共同研究(ミッション研究)	夏季アジアモンスーン循環からの東方流出渦を狙った国内でのエアロゾル粒子観測	R2
京都大学 防災研究所	短期滞在型共同研究	夏のダブルジェット力学変動と異常気象の実態解明	R2
総合地球環境学 研究所	共同研究(実践フルリサーチ)	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
鳥取大学 乾燥地研究センター	共同研究	陸面状態の影響を強く受けた黄砂発生量の数値モデルシミュレーションと予測	R2
九州大学 応用力学研究所	一般研究	高度な氷晶モデルに基づくライダー/レーダ解析技術の改良	R2
		微細規模から惑星規模にかけての海洋力学過程と規模間相互作用の研究	R2

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
原子力事故データの総合解析による事故時の有害物質大気中動態評価法の高度化	H30～R2
気候変動影響評価のための日本域の異常天候ストーリーラインの構築	R1～R3
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	R2～R4
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	R2～R4

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
------	-----	------

基盤研究(A)	最先端解析手法を用いた多様な地表面上でのシビア現象発生機構の解明と予測	R1～R3
	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	R1～R4
基盤研究(B)	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～R2
	粒子フィルタを用いた積乱雲の発生・発達に関する不確実性の解明	H29～R2
	地球システムモデルの高度化と北極域における黒色炭素粒子の気候影響評価	H30～R3
	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	R1～R4
	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	R1～R4
	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？	R1～R4
	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	R1～R4
	船舶搭載 GNSS による東シナ海水蒸気、波浪、海面高度の観測	R1～R4
基盤研究(C)	トレーサー濃度と気象観測値の同時データ同化による移流拡散シミュレーション高精度化	H29～R3
	偏光情報を用いた積雪物理量の計測技術開発と衛星データによる雪氷圏監視システム	H29～R2
	火山ガス成分と火山物理の融合的観測・分析による火山活動度の評価の研究	H29～R3
	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～R2
	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～R2
	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～R3
	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～R3
	地殻内大地震の発生予測に向けた応力蓄積分布の推定	H30～R3
	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	R1～R3
	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～R3
	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	R1～R3
	夏季成層圏-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	R2～R4
	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	R2～R4
	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	R2～R4
大気ー積雪ー海水系放射伝達モデルの開発と気候モデル用海氷	R2～R4	

	アルベドスキームの高度化	
	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	R2～R4
若手研究(B)	薄氷から厚氷までの全海氷データ同化による北極海熱・水輸送解析と気候変動予測の改善	H28～R2
	超高密度観測網に基づく地震動即時予測に向けて：機械学習による地震波の自動識別	H29～R2
	フェーズドアレイレーダーを用いた台風環境下における竜巻発生メカニズムの解明	H29～R3
	首都圏の高精度雨雪判別手法確立に向けた降雪機構の実態解明	H29～R2
	西太平洋－インドモンスーンと台風の変動メカニズムの解明	H29～R3
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～R3
	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	R1～R3
	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～R4
	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～R4
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	R1～R3
新学術領域研究 (研究領域提案型)	南極氷床表面質量収支高精度推定手法の確立	H30～R2
	過去40年間の南極氷床表面質量収支高精度計算	R2～R3
	対流圏成層圏結合が対流圏ジェット変動に及ぼす影響と中緯度海洋前線帯の役割	R2～R3
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	R1～R3
	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	R1～R3
	スピンドア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	R1～R3
国際共同研究加速基金	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～R3
	グリーンランド氷床気候システム研究最前線の開拓	H30～R3

【研究分担者として実施している研究課題】

課題区分	研究課題	研究期間
特別推進研究	グローバル水文学の新展開	H28～R2
新学術領域研究 (研究領域提案型)	雲・エアロゾルを介した中緯度大気海洋相互作用	R1～R5
	中緯度域の気候変動のメカニズム解明と予測可能性	R1～R5
	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	R1～R5

	端気象	
	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	R1～R5
	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	R1～R5
	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	R1～R5
特別研究促進費	令和元年台風 15 号による停電の長期化に伴う影響と風水害に関する総合調査	R1～R2
	令和元年台風 19 号及び台風 21 号による広域災害に関する総合研究	R1～R2
基盤研究(S)	豪雨と暴風をもたらす台風の力学的・熱力学的・雲物理学的構造の量的解析	H28～R2
	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～R4
基盤研究(A)	等温位/等密度座標に基づく大気/海洋大循環の解析	H27～R2
	海峡力学過程の統合と解剖	H28～R2
	結合データ同化システム開発の方法と応用	H29～R3
	揮発性が異なる元素の気化に伴う同位体分別が拓く環境地球化学の新展開	H30～R3
	大気と海洋の波動エネルギーのライフサイクル解析による熱帯気候変動メカニズムの解明	H30～R3
	世界最高水準の衛星海面ブラックスデータが明らかにする台風と海洋の関係	H30～R3
	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	R1～R4
	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
	高精度海氷情報取得のためのマイクロ波観測手法の開発	R2～R4
基盤研究(B)	アンサンブルデータ同化のための最適摂動手法に関する研究	H28～R2
	C 帯偏波フェーズドアレイ気象レーダのシステムデザイン	H29～R2
	寒冷渦が竜巻・突風現象発現の予測可能性に与える定量的評価	H29～R2
	低気圧に伴う竜巻の階層構造と予測可能性に関する基礎研究	H30～R2
	台風進路に関わる『藤原効果』の再考	H30～R4
	東日本の島弧地殻における非弾性変形マッピング	H30～R3
	水中の懸濁微粒子・ファインバブルおよび大気中の浮遊微粒子の実時間分析法の開発	R1～R3
	北極圏における氷河起源ダストが氷晶核分布に与える影響の評価	R1～R3
	海上放射線モニタリングによる原子力事故時放射性物質放出量の早期推定手法の確立	R1～R3
	拡散分離の定量評価により得られた大気組成の精密時空間変動	R1～R3

	に基づく温暖化影響の評価	
	黄砂発源地域の環境修復と持続的土地利用の両立を目指すキーソース管理手法の開発	R1～R3
	沖合津波観測による津波即時予測技術の共進化を可能にする標準評価法の創出	R1～R3
	次世代の天気予報での雷予報を見据えた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
基盤研究(C)	西岸境界流続流における組織的流れの形成メカニズムに関する研究	H29～R2
	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～R3
	レーダー降雪分類と雲物理過程に基づく新積雪物理量の時空間変化推定手法の開発	R1～R3
	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～R3
	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～R3
	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

2. 2. 研究年次報告

本節には、気象研究所が令和2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2年度に中間評価を実施した研究課題（2課題）については、2.3節で、令和2年度に終了した研究課題（2課題）については2.4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	23
・ P 大気物理過程の解明とモデル化に関する研究	43
・ 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	59
・ C 気候・地球環境変動の要因解明と予測に関する研究	79
・ S 地震と津波の監視・予測に関する研究	101
・ V 火山活動の監視・予測に関する研究	109

2. 2. 2. 地方共同研究

・ 全天カメラによる雲の地上観測システムの開発	122
・ 沖縄地方の低周波地震の震源決定と発生状況等の調査	125
・ 高精度な津波数値計算結果を用いた津波の地域特性の理解	127
・ 二重偏波レーダーを用いた火山噴煙の解析的研究	129

M 地球システム・海洋モデリングに関する研究

研究年次：2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（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

〔全球大気海洋研究部〕○石井正好、吉村裕正、出牛 真、神代 剛、吉田康平、新藤永樹、高谷祐平、大島 長、浦川昇吾、行本誠史

〔気象予報研究部〕川合秀明、長澤亮二

〔気候・環境研究部〕保坂征宏、水田 亮、田中泰宙、辻野博之

〔応用気象研究部〕小畑 淳

（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

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

〔気候・環境研究部〕辻野博之

（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

〔全球大気海洋研究部〕○高野洋雄、藤井陽介、碓氷典久、広瀬成章、山中吾郎、中野英之、豊田隆寛、坂本 圭、浦川昇吾、石川一郎、高谷祐平

〔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

（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

〔全球大気海洋研究部〕○石川一郎、高谷祐平、新藤永樹、齊藤直彬、藤井陽介、豊田隆寛、山中吾郎、浦川昇吾、吉田康平、行本誠史

〔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

〔全球大気海洋研究部〕○眞木貴史、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、近藤圭一

〔台風・災害気象研究部〕永井智広

〔気候・環境研究部〕直江寛明、田中泰宙

〔応用気象研究部〕川端康弘

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。

（気象研究所の実績）

各副課題に対応するこれまでの気象研究所の実績は次のとおりである。

（副課題 1）

地球温暖化予測のための高精度な気象研究所地球システムモデル MRI-ESM2 を開発した。このモデルは以前のモデルに比べて、放射分布の再現性をはじめ多くの点で性能が向上している。IPCC の第 6 次評価報告書（IPCC-AR6）に重要な貢献をする第 6 期結合モデル比較計画（CMIP6）に参加し、MRI-ESM2 を使用して気候変化再現実験や将来予測シナリオ実験を含む多くの実験を実施した。その結果は公開され、多くの研究コミュニティに利用されている。

（副課題 2）

気象研究所共用海洋モデル（MRI.COM）は、これまでの気象庁における海況監視予測業務、及び地球システムモデルを用いた地球温暖化業務や 2008 年以降の季節予報業務で用いられてきた。昨年度までの 5 カ年計画では、サブグリッドスケールのパラメタリゼーションの改良等により気候変動用の海洋モデリング技術を改良するとともに、多段階ネスティング手法を用いた沿岸域の海洋モデリング技術を開発した。海況監視予測業務等に資する全球渦無し海洋モデル、北太平洋渦解像モデル、日本近海 2km モデルを開発した。

（副課題 3）

これまでの気象庁における海洋情報業務、及び 2008 年以降の季節予報業務で用いられる海洋データ同化システムの構築とその基盤となる同化手法の開発は、全て気象研究所で実施されてきた。昨年度までの 5 カ年計画では、次世代の季節予報システム開発の一環として、4 次元変分法（4D-VAR）と海氷同化を採用した新しい全球海洋データ同化手法を開発した。また海況情報業務の改善に向けて、日本近海データ同化手法を開発し、その手法を適用した日本沿岸海況監視予測システムを構築した。また、季節予報や台風予測等の精度向上を目的として大気海洋結合同化システムを開発した。

（副課題 4）

全球渦許容海洋モデルを開発し、渦なし海洋モデルに 4 次元変分法を適用した同化システムの結果から渦許容海洋モデルに適合する初期値を作成する手法を開発した。全球渦許容海洋モデルと気象庁全球大気モデル（GSM）とを結合した大気海洋結合モデルを構築した。

(副課題5)

気象研究所地球システムモデルにおけるエアロゾル・オゾン等の化学輸送モデルに加え、気象庁環境気象管理官業務（黄砂予測、紫外線予測業務）や数値予報業務（エアロゾル気候値、オゾン解析値）で用いられている全球エアロゾル輸送モデルや全球化学輸送モデルの開発を進めてきた。領域化学輸送モデルは環境気象管理官業務（大気汚染気象予測）で活用されている。これらの化学輸送モデルに対してデータ同化手法の開発を進めてきており、その一部は気象庁業務に環境気象管理官業務等で活用されている。また、二酸化炭素技術情報で用いられる逆解析技術の開発を継続している。エアロゾルライダーの観測を継続し、成層圏長期変動の監視を長期間継続してきた。衛星観測データのリトリーバル手法の開発を行ってきた。分光日射観測を継続し、本庁に技術指導等を実施してきた。

研究の目的

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)

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)

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)

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)

季節予報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)

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。

研究の成果の到達目標**(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)

- ・ 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。
- ・ 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)

- ・ 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)

- ・ 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)

- ・ 令和 3 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。
- ・ 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)

- ・ 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、エアロゾル・オゾンに関しては本庁での業務開始・高度化を支援する。
- ・ エアロゾル・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。

令和 2 年度の研究計画

(副課題 1)

高解像度化を可能にする新しい地球システムモデルの基幹となる大気・海洋結合部の開発に注力し、数日以上前からの台風の発生や強度の予測や大気海洋間のフラックス交換の精度を高め、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する作業を継続して全球規模の気候変動予測の高精度化を図る。さらに、既存の地球システムモデルや新しいモデルに試験導入し、地域規模の現象の高精度な再現と変動予測の改善を試みる。

(副課題 2)

(1) 海洋モデルのプロセス改良

- ・ 海氷プロセスや海面フラックスなどの大気海洋境界過程の精緻化

(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及び大気波浪結合モデルによる予報実験の実施

(3) 海洋変動機構の解明に関する研究

- ・ 現在気候再現実験の実施と海盆毎の海洋変動メカニズムの解明

(4) 海洋モデルの開発基盤の整備

- ・汎用的な港湾モデルの開発、解析ツールの共有化

(副課題3)

(1) 昨年までに開発したシステムの現業化に向けた検証・改良

- ・現業化のための精度評価と改良

(2) 新たな海洋データ同化手法の開発

- ・4D-VAR 同化手法の改善、
- ・衛星海面水温データを直接同化する手法の開発

(3) 大気海洋結合同化システムの改良

- ・大気海洋結合同化システムの改良
- ・大気海洋結合予測に向けた初期値の作成

(4) 海洋観測のインパクト評価

- ・海洋観測データが海況の監視・予測に与える影響等の評価
- ・黒潮流路の変動メカニズム等、海洋諸現象の解明

(副課題4)

(1) 次期季節予測システムの運用開始(R3 年度予定)に向けた開発・精度評価

- ・R1 年度に実施した試験的再予報の精度評価、本格的な再予報に向けた調整・準備、再予報の実施

(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

- ・高解像度化の影響評価実験、結合系のアンサンブル手法の開発、結合モデルの季節内予測への適用に関するフィジビリティ研究

(3) 海洋観測システムの季節予報への影響に関する研究

- ・予測実験の実施と予備的な解析

(副課題5)

(1) 化学輸送モデルに関する研究。

- ・NHM-Chem 改良 (asuca 対応等)
- ・全球エーロゾル、化学輸送モデル改良
- ・全球大気化学統合モデルの開発

(2) データ同化・応用技術に関する研究

- ・2D-Var、LETKF 等の同化システム開発
- ・組成別光学的厚さのデータ同化システム開発
- ・逆解析 (CO₂、BC 等)

(3) 大気微量成分の鉛直分布観測

- ・化学輸送モデル検証のためのエーロゾルや対流圏オゾンの鉛直分布観測

令和2年度の研究成果

成果の概要

(1) 課題全体

中期計画開始の2年目であり、研究計画の詳細が固まって、それに沿った研究が順調に実施できた。具体的には、開発したシステムの気象庁での現業化（日本沿岸海況監視予測システム、大気汚染気象業務、黄砂予測業務、二酸化炭素分布情報提供業務など）を支援した。現課題のモデル開発に関しては、次期地球システムモデル(MRI-ESM3)、高分解能大気海洋結合モデルを用いた中期予報、大気波浪結合モデル、次期大気海洋結合同化システム、結合系アンサンブル手法、海面水温直接同化手法、領域化学輸送モデルなど各種モデル・手法の開発など着実に成果を挙げた。また、モデルを用いた気候や海洋の変動メカニズム解明に取り組んだ。

(2) 副課題

(副課題1)

- 気象庁現業で使用されているものと同じ各種モデルを組み合わせた次期地球システムモデルの開

発に着手した。新パソコン移行は問題なく完了し、大気海洋結合、雲・エアロゾル過程などの地球システムモデル向けの拡張機能や化学プロセスを組み込む作業を行った。併せて、モデル検証体制を拡充した。

- b. 陸面モデル開発体制を構築し、部外機関との連携を含めた今後の開発計画を立案した。
- c. 第6期国際結合モデル比較プロジェクト (CMIP6)で、参加した実験の実施と出力データの提出の両方を完了した。CMIP6 実験に参加することで現地球システムモデルの基本性能を理解し、研究成果は多数の主著・共著論文で公開された。

(副課題2)

- a. 海氷モデルにおけるパラメータの最適化を行い、海氷分布の再現性が向上することを確認した。大気モデルと海面フラックスの共通化を図るため、ECMWF 準拠のバルク式を海洋モデルに導入した。
- b. GSM1705 ベースの大気モデル (TL319L100) と海洋モデル (MRI.COM、解像度 1×0.5 度) の結合モデルを用いて、2018年9月～2019年8月における毎日の11日予測実験を行った。結合モデルでは、大気単体モデルと比較して、海洋初期化を工夫することにより、予測期間の後半で大気場 (南北両半球の 500hPa 高度など) の予測精度が改善すること、結合に伴う初期ショックが当初懸念されたほど顕著ではないことを確認した。また、大気波浪結合モデルのプロトタイプ (大気モデル: TL319L100、波浪モデル: MRI-III、解像度 0.5°) の新計算機での動作確認・改良を進めるとともに、予備的な調査として結合インパクトを調べた。
- c. 日本沿岸潮位の長期変動の要因を明らかにするため、NOAA と ECMWF の二種類の 20 世紀大気再解析データを用いて 1900 年以降の再現実験を行った。また、海洋モデルの国際比較実験 (OMIP) の解析を通じて海洋モデルのバイアス等の特性を把握するとともに、東経 137 度の水塊形成過程など海洋の変動メカニズムの解明を進めた。加えて、最近発表されたエネルギーフラックスの定式化に基づいたエネルギー収支診断ツールを用いて、1997-1998 年と 2005-2006 年の大きなエルニーニョ発達のエネルギー循環を解明した。さらに、日本周辺の海況 (海水温、海面水位、海氷、海洋循環) の将来の気候変化の要因について解析を実施した。
- d. 日本沿岸海況監視予測システムの現業化や海洋情報利活用に関する支援を行った。また、NAPS11 に導入が予定される次期海況システムについて、海洋気象情報室や数値予報課などの関係部署と調整して開発計画を作成した。
- e. GitHub を用いて部外利用者の要望等を海洋モデル開発に反映させた。湾モデルの構築を容易にする「湾モデル構築パッケージ」を作成した。

(副課題3)

- a. 漂流ブイデータを用いて、現行の北太平洋 4 次元変分法海洋データ同化システムによる海面水温場の精度検証を行い、MGDSST よりも高精度に解析されていることを確認した。また、更なる精度向上に向け、海面水温を独立変数とした新たな解析スキームの開発に着手した。
- b. 次期季節予報システム (CPS3) 用四次元変分法全球海洋データ同化システム (MOVE-G3) について性能評価を継続的に実施すると共に、地球システムモデル技術開発室 (旧気候情報課) で実施する現業化に向けた検証を支援し、海氷の再現性を向上等のための改良を行った。
- c. 大気海洋結合同化システムの高度化に向けて、昨年度までに開発したシステムのインパクト評価を昨年から継続して行い、2 件の論文として発表した。また、上記の評価を踏まえ、大気海洋結合同化システムに、四次元変分法全球海洋データ同化システム (MOVE-G3) を含む次期季節予報システム (CPS3) を組み込む作業を開始した。
- d. 海洋観測データの予測に対するインパクトについて、国内外の研究成果や課題をとりまとめた。新たに打ち上げが予定されている面的海面高度衛星の観測システムシミュレーション実験を実施し、改善のインパクトを確認した。
- e. 日本近海の海洋同化システムを用いて、特に 2011 年と 1971 年の異常潮位に対するメカニズム解明を行った。
- f. 国際研究プロジェクト OceanPredict の枠組みに対し、最近の開発成果を取りまとめ、国連海洋科学 10 年のプログラム応募や海洋観測システム評価プロジェクトの策定に協力した。

(副課題4)

- a. 次期季節予測システム(CPS3)の開発を数値予報課(旧気候情報課)と共同で進め、数値予報課において性能評価のための再予報実験を実施し、基本的な精度検証を行って、全般的な予報成績の向上を確認した。
- b. アンサンブル手法として、副課題3で開発された4DVARの解析誤差共分散を近似する海洋初期値摂動作成手法を開発中のCPS3に適用し、有効性を評価した。
- c. 海洋観測の季節予報へのインパクトを評価する実験について、現行季節予測システム(CPS2)を用いて実施し、結果をマルチモデル比較のために提供し、解析を行っている。
- d. 将来の季節予測システムの初期値作成手法の改善の検討に向け、気象研究所で開発された大気海洋結合同化システム(MRI-CDA1)を用いて、季節内スケールでの海面水温と降水の時間変化の関係の再現性に対する結合化のインパクトを示す研究を行い、論文として発表した。
- e. 2010年夏の記録的な高温に対する大西洋の海水温の影響、および、2020年梅雨期の多雨に及ぼすインド洋の変動の影響について、現行季節予測システム(CPS2)を用いて研究を行い、同システムのプロセスの再現性や予測性能を示した。

(副課題5)

- a. M1課題等と連携してCMIP6関連の追加実験等を実施し、結果を提出すると共にMRI-ESM2に関連する論文を多数発表した。
- b. 領域化学輸送モデルを精緻化すると共に、気象とのフィードバック過程のプロトタイプを開発した。
- c. 地球観測衛星GCOM-C(SGLI)のデータ同化システムを構築し、気象研究所においてデータ同化実験を実施中である。
- d. JRA-3Q用に化学輸送モデルを用いたオゾン3次元分布を提供すると共にプロダクトの評価検証を実施した。
- e. 深層学習を用いた視程予測システムを試作すると共に、気象場のダウンスケーリング手法を開発した。
- f. エアロゾル再解析(JRAero)V1の解析期間を延長した。
- g. 二酸化炭素解析に衛星観測データを取り込むシステムを構築し、二酸化炭素収支等を評価した。
- h. 地上エアロゾルライダー観測データを用いたMRI-ESM2エアロゾルシミュレーション結果の評価検証を実施中。

計画に対する進捗度及び変更点

- (1) 当初計画に対する進捗度(計画した線表通りに研究が進捗しているかを記述)
順調に進捗している。
- (2) 当初計画から変更した点(研究手法の変更点など)
なし。

本課題の成果から施策や他の研究への波及状況

(外部機関や所内外の研究課題への波及効果)

(副課題1)

地球システムモデル開発によって得られたモデル開発に関する知見は、必要に応じて、気象庁現業モデル開発において参照されている。また、CMIP6実験の結果は、国内外の地球温暖化研究や適応研究で活用されている。

(副課題2)

- ・ 日本沿岸海況監視予測システム(JPNシステム)は令和2年10月28日に気象庁の海況監視予測業務において現業運用が開始された。また、JPN再解析データは、大学や研究機関にこれまで14件の提供実績があり、日本の海洋研究コミュニティで広く活用されている。
- ・ 日本周辺の海況(海水温、海面水位、海氷、海洋循環)の将来予測結果は、令和2年12月2日に「日本の気候変動2020」して公表された。
- ・ 全球海洋モデル(GONDOLA_100)の結果は、国際比較研究(OMIP)で活用されている。

(副課題3)

前中期計画より開発を継続している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を利用することで、次期季節予報システム（CPS3）の予測性能が向上することが確認された。現業利用に向けた改良・調整を地球システムモデル技術開発室（旧気候情報課）と協力して進めている。

（副課題4）

開発中の次期季節予報システム（CPS3）の予測精度が現行システムに比べて向上していることが確認され、季節予報の精度向上につながることを期待される。

（副課題5）

- ・ NHM-Chemの改良版（asuca-chem）は令和4年度に気象庁の大気汚染気象業務において現業化の予定である。
- ・ GCOM-Cデータ同化システム（2D-Var）は令和5年以降に気象庁黄砂予測業務において現業運用が開始される見込である。
- ・ JRA-3Q用オゾン観測データ品質管理手法やデータ同化システムはJRA-3Qへのプロダクト提供に加え、科研費課題等に活用された。
- ・ NHM-LETKFデータ同化システムによって計算されたモデル解析値は科研費課題、推進費課題、他機関との共同研究（鳥取大等）に活用された。
- ・ 二酸化炭素の衛星逆解析システムは科研費課題、推進費課題やGOSAT研究公募等において活用された。
- ・ 北極評議会・北極圏監視評価プログラム作業部会・短寿命気候強制力因子の評価報告書に記載するためのモデル計算を本課題で開発されたMRI-ESM2を用いて実施し、計算結果を提出した。
- ・ 気象研エーロゾルライダーによる成層圏エーロゾル長期観測データが、米国大気研究センター（NCAR）の全大気気候モデル（WACCOM6）の検証用データとして使用され、結果が公表された。
(<https://doi.org/10.1029/2019JD030943>)
- ・ 気象研エーロゾルライダーを用いた夏季アジアモンスーン循環からの東方流出渦内のエーロゾル粒子の観測結果が、北海道大学との共同研究により論文化された。
(<https://acp.copernicus.org/preprints/acp-2020-980/>)

他省庁予算及び共同研究等からの反映状況

（他省庁予算等研究課題から本課題への波及効果）

（1） 他省庁予算

- ・ 環境研究総合推進費「地球温暖化に関わる北極ブラックカーボンとダスト粒子の動態と放射効果」から得られた観測データや知見により全球エアロゾル輸送モデルを高度化することができた。
- ・ 「全球エアロゾルモデルによる黄砂の長期変動再現と将来予測」から得られた黄砂関連の観測データを用いて全球エアロゾルモデルの評価検証を実施中である。
- ・ 「原子力事故データの総合解析による事故時の有害物質大気中動態評価法の高度化」で得られた知見をフィードバックして領域化学輸送モデルやそのデータ同化システム開発の進捗を図ることができた。

（2） 共同研究

鳥取大学乾燥地研究センターとの共同研究により、モンゴルゴビ砂漠における観測データ等を入手して黄砂発生過程の研究を実施中。

北海道大学水産学部との共同研究により、JPNデータを境界条件として津軽海峡と函館湾を対象としたダウンスケーリングモデルを構築し、函館湾の水質に流動場が及ぼす影響を調査中。

（2） 公募型共同利用による研究

- a. 地球シミュレータ公募課題で、高解像度大気モデルを粗い海洋モデルに結合した短期の台風予測実験を実施した。海洋研究開発機構で開発しているモデルとの比較実験を進め、解像度や熱帯の40～50日変動が台風の発生や進路予測に与える影響などについて考察が進められ、これらの成果を本所におけるモデル開発で取り込んだ。
- b. 「データ同化システムにおける誤差情報の高度利用に関する研究（3）（令和2年度）」（統計数理研究所）において、次期季節予報システム（CPS3）の海洋アンサンブルメンバー作成手法の改良について検討を行った。

- c. 「FishTech によるサステイナブル漁業モデルの創出」における On-Spot データ同化手法の開発に関わる共同研究（令和元年度～令和4年度）（海洋研究開発機構）で得た沿岸同化に関する知見を日本沿岸海況監視予測システムの改良に活かしている
- d. GOSAT 研究公募より得ることができた GOSAT 観測データを本課題に活用することができた。
- e. JAXA 地球観測研究公募「GCOM-C SGLI エアロゾルプロダクトを用いたエアロゾルデータ同化予測システムの構築と検証」より得ることができた GCOM-C SGLI エアロゾル観測データを本課題に活用することができた。
- f. 東京大学大気海洋研究所学際連携研究「海氷モデル力学パラメータに対する観測・理論・数値的要請の融合」により、最新の観測的知見からの議論を行い、海氷モデルのパラメータ最適化研究の検証に活用した。

（3）科学研究費補助金

- a. 基盤 C 「マルチモデル相互比較による事例別の季節予測可能性」において、2014 年のエルニーニョ不発事例について、気象研モデルを用いた季節予測結果と他機関の予測結果とを比較した。これらの取り組みは、モデルに依存する誤差の要因の特定に活かされることが期待される。
- b. 基盤 A 「結合同化システム開発の方法と応用（平成 29～令和 3 年度、研究代表者：統計数理研究所 上野玄太）」では多様な結合モデルに対する同化手法の検討とその評価を行っており、得られた知見は気象研究所における結合同化システムの改良に活用されている。
- c. 基盤 A 「海峡力学過程の統合と解剖」（平成 28～令和 2 年度、研究代表者：九州大学 広瀬直毅）で得られた日本海海峡通過流量の変動メカニズムは、日本沿岸海況監視予測システムの改良に活用されている。
- d. 基盤 A 「大気と海洋の波動エネルギーのライフサイクル解析による熱帯気候変動メカニズムの解明」（平成 30 年～令和 3 年度、代表：相木秀則（名大））で得られた ENSO のエネルギーフロー診断ツールは、ENSO の解析に活用されることが期待される。
- e. 基盤 B 「西岸境界流と内側沿岸循環の力学的相互作用」（令和 2～5 年度、代表：田中潔（東大））で得られた駿河湾の循環場の解析・検証に関する知見は、日本沿岸海況監視予測システムの改良に活用されている。
- f. 新学術「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」（令和元年～令和 5 年度、研究代表：海洋研究開発機構 野中正見）で得られた黒潮続流域の変動メカニズムは日本沿岸海況監視予測システムの改良に活用されている。
- g. 基盤 C 「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」（平成 30 年～令和 3 年度、研究代表者：碓氷典久）で得られた黒潮変動や沿岸域の黒潮による暖水波及メカニズムは日本沿岸海況監視予測システムの改良に活用されている。
- h. 国際共同加速基金（H29-R1）「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」（代表：梶野主任研究官）で、フランス・クレルモン・オーベルニュ大学に渡航し、NHM-Chem によるエアロゾル・雲の粒径分布・化学組成の評価を行うために、Puy-de-dome 山頂観測所のデータの提供を受けた。
- i. 基盤 A 「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」に参画することにより統合粒子モデルの精緻化を行うことができた。
- j. 基盤 B 「地球システムモデルの高度化と北極域における黒色炭素粒子の気候影響評価」に参画することにより全球エアロゾル輸送モデルの BC 変質過程等を高度化することができた。
- k. 基盤 C 「トレーサー濃度と気象観測値の同時データ同化による移流拡散シミュレーション高精度化」から得られた知見により大気微量成分と気象場の同時データ同化システムを開発することができた。
- l. 基盤 C 「衛星観測データを活用した次世代炭素収支解析システムの構築」に参画することにより化学輸送モデルおよびデータ同化システムの研究が進展した。
- m. 基盤 C 「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」において、オゾン全量の Level12 衛星観測データを地上からの観測と比較し結合データセットを作成した。このデータセットは、気象庁の次期長期再解析の境界条件と使われるオゾンの基礎的データとなる。
- n. 新学術領域研究「変わりゆく気候系における中緯度大気海洋相互作用 hotspot」において、気象研の全球モデルと領域モデルを組み合わせた大規模アンサンブル実験を用いて、日本の局所的な豪雨の発生確率の予測可能性を評価する研究を実施した。この取り組みは、豪雨の発生確率の季

節予測の精度向上に活かされることが期待される。

今後の課題

- ・ 次期地球システムモデル（MRI-ESM3）への新たな境界層過程の導入に向け、研究・開発を加速する必要がある。
- ・ 高分解能大気海洋結合モデルや大気波浪結合モデルを気象庁の現業で用いるために、高速化と計算安定化を継続する必要がある。得られた知見は数値予報課と適宜共有しつつ、開発を進める必要がある。
- ・ 日本周辺の海面水位の過去の上昇量を適切に評価するためには、20世紀初頭を含む長期間の再現実験を行い、変動の要因を明らかにする必要がある。
- ・ 将来の季節予測システムにおける大気海洋結合系の初期値作成手法の候補として、気象研究所において大気海洋結合同化システム（MRI-CDA1）が開発され、短期再解析実験と性能評価が実施されたが、季節予測へのインパクトはまだ評価されていない。季節予測の精度評価のためにはある程度長期にわたる再予報実験が必要であるが、現在の結合同化システムでは長期再解析の実行が難しく、今後長期再解析の可能なシステムの開発が課題である。また、結合同化のメリットをさらに高めるためには、衛星放射輝度や衛星散乱計など、大気と海洋両方の情報を持つ観測データの同化手法の高度化が必要であると考えられる。
- ・ 海洋同化システムによる海面水温解析は、現状においても MGDSST よりも高精度であることが確認されたが、更なる精度向上のために、新たな（海面水温を独立変数とするなどの）解析手法の開発が必要である。
- ・ 日本沿岸海況監視予測システムの夏季の黄海の水温に高温バイアスがあることが分かり、特に台風通過時に顕著なことが分かった。これは潮汐を与えていない解析値を用いてインクリメンタル法により初期値化することが原因と考えられ、成層構造の再現性が不十分になっている。今後、同化統計量やシステムの初期値化手法を改善することが課題である。
- ・ 本庁組織再編に伴い、旧環境気象業務における開発部門と業務部門が分離したことによる連携確保の方策（業務効率化等）と開発メンバーの確保。

研究成果リスト

（1）査読論文：73件

1. Kajino, M., H. Hagino, Y. Fujitani, T. Morikawa, T. Fukui, K. Onishi, T. Okuda, and Y. Igarashi, 2021: Simulation of the transition metal-based cumulative oxidative potential in East Asia and its emission sources in Japan. *Scientific Reports*, **11**, 6550.
2. Amino, T., Y. Iizuka, S. Matoba, R. Shimda, N. Oshima, T. Suzuki, T. Ando, T. Aoki, and K. Fujita, 2021: Increasing dust emission from ice free terrain in southeastern Greenland since 2000. *Polar Science*, **27**.
3. Koike, M., K. Goto-Azuma, Y. Kondo, H. Matsui, T. Mori, N. Moteki, S. Ohata, H. Okamoto, N. Oshima, K. Sato, T. Takano, Y. Tobo, J. Ukita, and A. Yoshida, 2021: Studies on Arctic aerosols and clouds during the ArCS project. *Polar Science*.
4. Aizawa, T., M. Ishii, N. Oshima, S. Yukimoto, and H. Hasumi, 2021: Arctic warming and associated sea ice reduction in the early 20th century induced by natural forcings in MRI-ESM2.0 climate simulations and multi-model analyses. *Geophysical Research Letters*, **48**.
5. Tebaldi, C., and Coauthors, 2021: Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth System Dynamics*, **12**, 253-293.
6. DeLang et al., 2021: Mapping yearly fine resolution global surface ozone through the Bayesian Maximum Entropy data fusion of observations and model output for 1990-2017. *Environmental Science & Technology*.
7. Derwent et al., 2021: Intercomparison of the representations of the atmospheric chemistry of pre-industrial methane and ozone in earth system and other global

- chemistry-transport models. *Atmospheric Environment*, **248**, 118248.
8. Keeble et al., 2021: Evaluating stratospheric ozone and water vapor changes in CMIP6 models from 1850–2100. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **21**, 5015–5061.
 9. Garfinkel et al., 2021: Influence of ENSO on entry stratospheric water vapor in coupled chemistry-ocean CCM and CMIP6 models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **21**, 3725–3740.
 10. P. T. Griffiths, L. T. Murray, G. Zeng, Y. M. Shin, N. L. Abraham, A. T. Archibald, M. Deushi, L. K. Emmons, I. Galbally, B. Hassler, L. W. Horowitz, J. Keeble, J. Liu, O. Moeini, V. Naik, F. M. O’ Connor, N. Oshima et al., 2021: Tropospheric ozone in CMIP6 Simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **21**, 4187–4218.
 11. Takaya, Y., N. Saito, I. Ishikawa, S. Maeda, 2021: Two Tropical Routes for the Remote Influence of the Northern Tropical Atlantic on the Indo–western Pacific Summer Climate. *Journal of Climate*, **34**, 1619–1634.
 12. Allen, R. J., L. W. Horowitz, V. Naik, N. Oshima, F. M. O’ Connor, S. Turnock, S. Shim, P. Le Sager, T. van Noije, K. Tsigaridis, S. E. Bauer, L. T. Sentman, J. G. John, C. Broderick, M. Deushi, G. A. Folberth, S. Fujimori, and W. J. Collins, 2021: Significant climate benefits from near-term climate forcer mitigation in spite of aerosol reductions. *Environmental Research Letters*, **16**, 034010.
 13. Fujiwara, M., T. Sakai, T. Nagai, K. Shiraishi, Y. Inai, S. Khaykin, H. Xi, T. Shibata, M. Shiotani, and L. L. Pan, 2021: Lower-stratospheric aerosol measurements in eastward shedding vortices over Japan from the Asian summer monsoon anticyclone during the summer of 2018. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **21**, 3073–3090.
 14. Iizumi, T., Y. Takaya, W. Kim, T. Nakaegawa, S. Maeda, 2021: Global within-season yield anomaly prediction for major crops derived using seasonal forecasts of large-scale climate indices and regional temperature and precipitation. *Weather and Forecasting*, **36**, 285–299.
 15. Yoshida, M., K. Yumimoto, T. M. Nagao, T. Y. Tanaka, M. Kikuchi, and H. Murakami, 2021: Satellite retrieval of aerosol combined with assimilated forecast. *Atmospheric Chemistry and Physics*.
 16. Keen, A., E. Blockley, D. Bailey, J. B. Debernard, M. Bushuk, S. Delhaye, D. Docquier, D. Feltham, F. Massonnet, S. O’ Farrell, L. Ponsoni, J. Rodriguez, D. Schroeder, N. Swart, T. Toyoda, H. Tsujino, M. Vancoppenolle, and K. Wyser, 2021: An inter-comparison of the mass budget of the Arctic sea ice in CMIP6 models. *The Cryosphere*, **15**, 951–982.
 17. Kajino, M., K. Adachi, Y. Igarashi, Y. Satou, M. Sawada, T. T. Sekiyama, Y. Zaizen, A. Saya, H. Tsuruta, and Y. Moriguchi, 2021: Deposition and dispersion of radio-cesium released due to the Fukushima nuclear accident: 2. Sensitivity to aerosol microphysical properties of Cs-bearing microparticles (CsMP). *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, **126**, e2020jd033460.
 18. Nishikawa, S., T. Wakamatsu, H. Ishizaki, K. Sakamoto, Y. Tanaka, H. Tsujino, G. Yamanaka, M. Kamachi and Y. Ishikawa, 2021: Development of high-resolution future ocean regional projection datasets for coastal applications in Japan. *Progress in Earth and Planetary Science*, **8**, 7.
 19. Fujii, Y., T. Ishibashi, T. Yasuda, Y. Takaya, C. Kobayashi, and I. Ishikawa, 2021: Improvements in tropical precipitation and sea surface air temperature fields in a coupled atmosphere-ocean data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **147**, 1317–1343.
 20. Gillett, N. P., M. Kirchmeier-Young, A. Ribes, H. Shiogama, G. Hegerl, R. Knutti, G. Gastineau, J. G. John, L. Li, L. Nazarenko, N. Rosenbloom, Ø. Seland, T. Wu, S. Yukimoto, and T. Ziehn, 2021: Constraining human contributions to observed warming since the

pre-industrial period.. *Nature Climate Change*.

21. Nakano, H., Y. Matsumura, H. Tsujino, S. Urakawa, K. Sakamoto, T. Toyoda, G. Yamanaka, 2021: Effects of eddies on the subduction and movement of water masses reaching the 137° E section using Lagrangian particles in an eddy-resolving OGCM. *Journal of Oceanography*, **77**, 283-305.
22. Thornhill, G. D., W. J. Collins, R. J. Kramer, D. Olivié, R. B. Skeie, F. M. O'Connor, N. L. Abraham, R. Checa-Garcia, S. E. Bauer, M. Deushi, L. K. Emmons, P. M. Forster, L. W. Horowitz, B. Johnson, J. Keeble, J.-F. Lamarque, M. Michou, et al., 2021: Effective radiative forcing from emissions of reactive gases and aerosols - a multi-model comparison. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **21**, 853-874.
23. Kobayashi, C., Y. Fujii, I. Ishikawa, 2021: Intraseasonal SST-Precipitation Relationship in a coupled reanalysis experiment using the MRI coupled atmosphere-ocean data assimilation system. *Climate Dynamics*.
24. Kinase, T., K. Adachi, T. T. Sekiyama, M. Kajino, Y. Zaizen, and Y. Igarashi, 2020: Temporal variations of 90Sr and 137Cs in atmospheric depositions after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident with long-term observations. *Scientific Reports*, **10**, 21627.
25. Moseid, K. O., M. Schulz, T. Storelvmo, I. R. Julsrud, D. Olivié, P. Nabat, M. Wild, J. N. S. Cole, T. Takemura, N. Oshima, S. E. Bauer, and G. Gastineau, 2020: Bias in CMIP6 models as compared to observed regional dimming and brightening. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 16023-16040.
26. Kubota, T., H. Kuroda, M. Watanabe, A. Takahashi, R. Nakazato, M. Tarui, S. Matsumoto, K. Nakagawa, Y. Numata, T. Ouchi, H. Hosoi, M. Nakagawa, R. Shinohara, M. Kajino, K. Fukushima, Y. Igarashi, N. Imamura, G. Katata, 2020: Role of advection in atmospheric ammonia: A case study at a Japanese lake basin influenced by agricultural ammonia sources. *Atmospheric Environment*, **243**, 117856.
27. Naohiro Kosugi, Nariaki Hirose, Takahiro Toyoda and Masao Ishii , 2020: Rapid freshening of Japan Sea Intermediate Water in the 2010s. *Journal of Oceanography*, **76**.
28. Archibald et al., 2020: Tropospheric Ozone Assessment Report: A critical review of changes in the tropospheric ozone burden and budget from 1850 to 2100. *Elementa: Science of the Anthropocene*, **8**, 1.
29. Kawai, H., and S. Shige, 2020: Marine low clouds and their parameterization in climate models. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **98**, 1097-1127.
30. Takaya, Y., I. Ishikawa, C. Kobayashi, H. Endo, and T. Ose, 2020: Enhanced Meiyu-Baiu Rainfall in Early Summer 2020: Aftermath of the 2019 Super IOD Event. *Geophysical Research Letters*.
31. Qin, X., M. Yamaguchi, N. Usui, and N. Hirose, 2020: Environmental conditions determining the timing of the lifetime maximum intensity of tropical cyclones over the western North Pacific and their frequency of occurrence. *Advances in Atmospheric Sciences*. (submitted)
32. Turnock, S. T., R. J. Allen, M. Andrews, S. E. Bauer, M. Deushi, L. Emmons, P. Good, L. Horowitz, J. G. John, M. Michou, P. Nabat, V. Naik, D. Neubauer, F. M. O'Connor, D. Olivié, N. Oshima, M. Schulz, A. Sellar, S. Shim, T. Takemura, S. Tilmes, et al., 2020: Historical and future changes in air pollutants from CMIP6 models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 14547-14579.
33. Y.H. Zhao et al., 2020: On the role of trend and variability of hydroxyl radical (OH) in the global methane budget. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 13011-13022.
34. Niwa, Y., and Y. Fujii, 2020: A conjugate BFGS method for accurate estimation of a posterior error covariance matrix in a linear inverse problem. *Quarterly Journal of the Royal*

- Meteorological Society*, **146**, 3118–3143.
35. Stockdale, T. N., H. Naoe, K. Yoshida, S. Yukimoto et al., 2020: Prediction of the quasi - biennial oscillation with a multi - model ensemble of QBO - resolving models. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1–22.
 36. Couldrey, MP, J. M. Gregory, S. M. Griffies, H. Haak, A. Hu, M. Ishii, J. Jungclaus, O. A. Saenko, A. Shao, T. Suzuki, A. Todd, L. Zanna, 2020: What causes the spread of model projections of ocean dynamic level change in response to greenhouse gas forcing? . *Climate Dynamics*.
 37. Adachi, K., Oshima, N., Gong, Z., de Sá, S., Bateman, A. P., Martin, S. T., de Brito, J. F., Artaxo, P., Cirino, G. G., Sedlacek III, A. J., and Buseck, P. R., 2020: Mixing states of Amazon basin aerosol particles transported over long distances using transmission electron microscopy. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 11923–11939.
 38. Ito, R., T. Ose, H. Endo, R. Mizuta, K. Yoshida, A. Kitoh, T. Nakaegawa, 2020: Seasonal characteristics of future climate change over Japan and the associated atmospheric circulation anomalies in global model experiments. *Hydrological Research Letters*, **14**, 130–135.
 39. 石井 正好、森 信人, 2020: d4PDF: large-ensemble and high-resolution climate simulations for global warming risk assessment.. *Progress in Earth and Planetary Science*, **7**.
 40. Morgenstern et al., 2020: Reappraisal of the climate impacts of ozone - depleting substances. *Geophysical Research Letters*, **47**, e2020GL088295.
 41. Urakawa, L. S., H. Tsujino, H. Nakano, K. Sakamoto, G. Yamanaka, and T. Toyoda, 2020: The sensitivity of a depth-coordinate model to diapycnal mixing induced by practical implementations of the isopycnal tracer diffusion scheme. *Ocean Modelling*, **154**, 101693.
 42. Ge, B., S. Itahashi, K. Sato, D. Xu, J. Wang, F. Fan, Q. Tan, J. S. Fu, X. Wang, K. Yamaji, T. Nagashima, J. Li, M. Kajino, H. Liao, M. Zhang, Z. Wang, M. Li, J.-H. Woo, J. Kurokawa, Y. Pan, Q. Wu, X. Liu, and Z. Wang, 2020: Model Inter-Comparison Study for Asia (MICS-Asia) phase III: Multi-model comparison of reactive nitrogen deposition over China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 10587–10610.
 43. Dragović, S., M. Yamauchi, M. Aoyama, M. Kajino, J. Petrović, M. Ćujić, R. Dragović, M. Đorđević, J. Bór,, 2020: Synthesis of studies on significant atmospheric electrical effects of major nuclear accidents in Chrnobyl and Fukushima. *Science of Total Environment*, **733**, 139271.
 44. Kita, K., Y. Igarashi, T. Kinase, N. Hayashi, M. Ishizuka, K. Adachi, M. Koitabashi, T. T. Sekiyama and Y. Onda, 2020: Rain-induced bioecological resuspension of radiocaesium in a polluted forest in Japan. *Scientific Reports*, **10**, 15330.
 45. Kajino, M., H. Hagino, Y. Fujitani, T. Morikawa, T. Fukui, K. Onishi, T. Okuda, T. Kajikawa, and Y. Igarashi, 2020: Modeling transition metals in East Asia and Japan and its emission sources. *GeoHealth*, **4**, e2020GH000259. (in press)
 46. Kazuto TAKEMURA, Hitoshi MUKOUGAWA, Shuhei MAEDA, 2020: Large-scale atmospheric circulation related to frequent Rossby wave breaking nearJapan in boreal summer. *Journal of Climate*, **33**, 6371–6744.
 47. Dhaka, S. K., Chetna, V. Kumar, V. Panwar, A. P. Dimri, N. Singh, P. K. Patra, Y. Matsumi, M. Takigawa, T. Nakayama, K. Yamaji, M. Kajino, P. Misra, and S. Hayashida, 2020: PM2.5 diminution and haze events over Delhi during the COVID-19 lockdown period: an interplay between the baseline pollution and meteorology. *Scientific Reports*, **10**, 13442.
 48. Allen, R. J., S. Turnock, P. Nabat, P. Neubauer, U. Lohmann, D. Olivie, N. Oshima, et al., 2020: Climate and air quality impacts due to mitigation of non-methane near-term climate forcers. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 9641–9663.

49. Mori, T., Y. Kondo, S. Ohata, Y. Zhao, P. R. Sinha, N. Oshima, H. Matsui, N. Moteki, and M. Koike, 2020: Seasonal variation of wet deposition of black carbon in Arctic Alaska. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, **125**, e2019JD032240.
50. Oshima, N., S. Yukimoto, M. Deushi, T. Koshiro, H. Kawai, T. Y. Tanaka, and K. Yoshida, 2020: Global and Arctic effective radiative forcing of anthropogenic gases and aerosols in MRI-ESM2.0. *Progress in Earth and Planetary Science*, **7**, 38.
51. Tsujino, H., L. S. Urakawa, S. M. Griffies, G. Danabasoglu, 他 38 名, 2020: Evaluation of global ocean-sea-ice model simulations based on the experimental protocols of the Ocean Model Intercomparison Project phase 2 (OMIP-2). *Geoscientific Model Development*, **13**, 3643-3708.
52. Smith, C. J. et al., 2020: Effective radiative forcing and adjustments in CMIP6 models. *Atmospheric Chemistry and Physics*.
53. Skeie et al. , 2020: Historical total ozone radiative forcing derived from CMIP6 simulations. *npj Climate and Atmospheric Science*, **3**, 32.
54. Takagi, M., T. Ohara, D. Goto, Y. Morino, J. Uchida, T. T. Sekiyama, S. F. Nakayama, M. Ebihara, Y. Oura, T. Nakajima, H. Tsuruta, and Y. Moriguchi, 2020: Reassessment of early ¹³¹I inhalation doses by the Fukushima nuclear accident based on atmospheric ¹³⁷Cs and ¹³¹I/¹³⁷Cs observation data and multi-ensemble of atmospheric transport and deposition models. *Journal of Environmental Radioactivity*, **218**, 106233.
55. Zanis, P., Akritidis, D., Georgoulas, A. K., Allen, R. J., Bauer, S. E., Boucher, O., Cole, J., Johnson, B., Deushi, M., Michou, M., Mulcahy, J., Nabat, P., Olivié, D., Oshima, N., Sima, A., Schulz, M., Takemura, T., and Tsigaridis, K., 2020: Fast responses on pre-industrial climate from present-day aerosols in a CMIP6 multi-model study. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 8381-8404.
56. Joseph Ching and Mizuo Kajino, 2020: Rethinking Air Quality and Climate Change after COVID-19. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **2020**, **17(14)**, 5167.
57. M. Amos et al., 2020: Projecting ozone hole recovery using an ensemble of chemistry-climate models weighted by model performance and independence. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 9961-9977.
58. Tan, J., J. S. Fu, G. R. Carmichael, S. Itahashi, Z. Tao, K. Huang, X. Dong, K. Yamaji, T. Nagashima, X. Wang, Y. Liu, H.-J. Lee, C.-Y. Lin, B. Ge, M. Kajino, J. Zhu, M. Zhang, L. Hong, and Z. Wang, , 2020: Why do models perform differently on particulate matter over East Asia? A multi-model intercomparison study for MICS-Asia III. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20(12)**, 7393-7410.
59. Yoshida, A., N. Moteki, S. Ohata, T. Mori, M. Koike, Y. Kondo, M. Matsui, N. Oshima, A. Takami, and K. Kita, 2020: Abundances and microphysical properties of light - absorbing iron oxide and black carbon aerosols over East Asia and the Arctic. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, **125**, e2019JD032301.
60. Ishibashi, T., 2020: Improvement of accuracy of global numerical weather prediction using refined error covariance matrices. *Monthly Weather Review*, **148**, 2623-2643.
61. Toyoda, T., T. Aoki, M. Niwano, T. Tanikawa, L. S. Urakawa, H. Tsujino, H. Nakano, K. Sakamoto, N. Hirose, and G. Yamanaka, 2020: Impact of observation-based snow albedo parameterization on global ocean simulation results. *Polar Science*, **24**, 100521.
62. Holt, L. A., H. Naoe, K. Yoshida, S. Yukimoto et al., 2020: An evaluation of tropical waves and wave forcing of the QBO in the QBOi models. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1-27.
63. Sugi, M., Y. Yamada, K. Yoshida, R. Mizuta, M. Nakano, C. Kodama, M. Satoh, 2020: Future changes in the global frequency of tropical cyclone seeds. *SOLA*, **16**, 70-74.

64. Takigawa, M., P. K. Patra, Y. Matsumi, S. K. Dhaka, T. Nakayama, K. Yamaji, M. Kajino, and S. Hayashida, 2020: Can Delhi's pollution be affected by crop fires in the Punjab region?. *SOLA*, **16**, 86-91.
65. Sekiyama, T. and M. Kajino, 2020: Reproducibility of surface wind and tracer transport simulations over complex terrain using 5-, 3-, and 1-km grid models. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **59(5)**, 937-952.
66. Takegawa, N., T. Seto, N. Moteki, M. Koike, N. Oshima, K. Adachi, K. Kita, A. Takami, and Y. Kondo, 2020: Enhanced new particle formation above the marine boundary layer over the Yellow Sea: Potential impacts on cloud condensation nuclei. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*.
67. Minami, A. and Y. Takaya, 2020: Enhanced Northern Hemisphere correlation skill of subseasonal predictions in the strong negative phase of the Arctic Oscillation. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*.
68. Notz, D., J. Dorr, D. A. Bailey, E. Blockley, M. Bushuk, J. B. Debernard, E. Dekker, P. DeRepentigny, D. Docquier, N. S. Fuckar, J. C. Fyfe, A. Jahn, M. Holland, E. Hunke, D. Iovino, N. Khosravi, F. Massonnet, G. Madec, S. O'Farrell, A. Petty, et al., 2020: Arctic Sea Ice in CMIP6. *Geophysical Research Letters*, **47**, e2019GL086749.
69. Katata G., K. Matsuda, A. Sorimachi, M. Kajino, K. Takagi, 2020: Effects of aerosol dynamics and gas-particle conversion on dry deposition of inorganic reactive nitrogen in a temperate forest. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 4933-4949.
70. Naoe, H., T. Matsumoto, K. Ueno, T. Maki, M. Deushi, and A. Takeuchi, 2020: Bias correction of multi-sensor total column ozone satellite data for 1978-2017. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **98**, 353-377.
71. 庭野匡思, 青木輝夫, 橋本明弘, 大島 長, 梶野瑞王, 大沼友貴彦, 藤田耕史, 山口 悟, 島田利元, 竹内 望, 津滝 俊, 本山秀明, 石井正好, 杉山 慎, 平沢尚彦, 阿部彩子, 2021: 氷床表面質量収支の実態とそのモデリングの試み: 2020年夏最新版. *雪氷*, **83**, 27-50.
72. 高橋麗, 梶野瑞王, 津口裕茂, 林修吾, 橋本明弘, 2021: 雲凝結核が降水に与える影響—平成27年9月関東・東北豪雨を対象として—. *エアロゾル研究*, **36**, 55-64.
73. 伊藤耕介, 藤井陽介, 2020: 逆問題としての4次元データ同化. *ながれ*, **39**, 167-179.

(2) 査読論文以外の著作物 (翻訳、著書、解説) : 12 件

1. Ching, J., M. Kajino, and H. Matsui, 2020: Resolving aerosol mixing state increases accuracy of black carbon respiratory deposition estimates. *One Earth*, **3**, 763-776.
2. Fudeyasu, H., K. Yoshida, and R. Yoshida, 2020: Future Changes in Western North Pacific Tropical Cyclone Genesis Environment in High-Resolution Large-Ensemble Simulations. *Oceans*, **1**, 355-368.
3. Kosaka, Y., Y. Takaya, Y. Kamae, 2020: The Indo-western Pacific Ocean capacitor effect. *Tropical and Extratropical Air-Sea Interactions Modes of Climate Variations*, 141-162.
4. Sato, Y., T. T. Sekiyama, S. Fang, M. Kajino, A. Quérel, D. Quélo, H. Kondo, H. Terada, M. Kadowaki, M. Takigawa, Y. Morino, J. Uchida, D. Goto, and H. Yamazawa, 2020: A Model intercomparison of atmospheric ¹³⁷Cs concentrations from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, Phase III: Simulation with an identical source term and meteorological field at 1 km resolution. *Atmospheric Environment: X*, **7**.
5. Séférian, R., S. Berthet, A. Yool, J. Palmiéri, L. Bopp, A. Tagliabue, L. Kwiatkowski, H. Nakano, H. Tsujino, 他 19 名, 2020: Tracking improvement in simulated marine biogeochemistry between CMIP5 and CMIP6. *Current Climate Change Reports*, **6**, 95-119.
6. Mugo, R., S.-I. Saitoh, H. Igarashi, T. Toyoda, S. Masuda, T. Awaji, and Y. Ishikawa, 2020: Identification of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) pelagic hotspots applying a

satellite remote sensing-driven analysis of ecological niche factors: A short-term run. *PLOS ONE*, **15**, e0237742.

7. Sekiyama, T. T., 2020: Statistical Downscaling of Temperature Distributions from the Synoptic Scale to the Mesoscale Using Deep Convolutional Neural Networks. *arXiv*.
8. Koshiro, T., H. Kawai, and S. Yukimoto, 2020: Impact of cloud microphysics parameter on 20th century warming simulated in MRI-CGCM3. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Earth System Modelling*, **50**, 713-714.
9. Kawai, H., and T. Koshiro, 2020: Does Radiative Cooling of Stratocumulus Strengthen Summertime Subtropical Highs?. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Earth System Modelling/WMO*, **50**, 711-712.
10. Kawai, H., T. Koshiro, and S. Yukimoto, 2020: Relationship between shortwave radiation bias over the Southern Ocean and the ITCZ in MRI-ESM2. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Earth System Modelling/WMO*, **50**, 709-710.
11. 碓氷典久, 広瀬成章, 2020: 高解像度海洋モデル・データ同化システムを用いた黒潮流路変動研究. *月刊海洋*, **52**, 339-345.
12. 植田宏昭, 前田修平, 谷本陽一, 立花義裕, 2020: 2019年秋季「気候形成・変動機構研究連絡会」の報告. *天気*, **67**, 51-53.

(3) 学会等発表 : 63 件

1. Kosaka, Y., Y. Takaya, M. Watanabe, S. Maeda, The Pacific-Indian Ocean coupling and seasonal prediction of the Asian summer climate, WCRP-CLIVAR Workshop on Climate Interactions among the Tropical Basins, 2021年2月, オンライン
2. Takaya, Y., N. Saito, I. Ishikawa, S. Maeda, Two Tropical Routes for the Remote Influence of the Northern Tropical Atlantic on the Indo-western Pacific Summer Climate, WCRP-CLIVAR Workshop on Climate Interactions among the Tropical Basins, 2021年2月, オンライン
3. 今田由紀子, Potential Predictability of Extremes Estimated by Large Ensemble Simulations, AGU Fall Meeting 2020, 2020年12月, 米国, virtual
4. Kobayashi, C., and I. Ishikawa, Prolonged Northern-Mid-Latitude Tropospheric Warming in 2018 Well Predicted by the JMA Operational Seasonal Prediction System, AGU Fall Meeting 2020, 2020年12月, 米国, virtual
5. Takaya, Y., N. Saito, I. Ishikawa, S. Maeda, Y. Kosaka, M. Watanabe, Rethinking the ENSO-monsoon relationship in light of trans-basin interactions, 2020 AGU Fall Meeting, 2020年12月, アメリカ, サンフランシスコ
6. Fujii, Y., C. Kobayashi, I. Ishikawa, Y. Takaya, and T. Ishibashi, Evaluation of the lead-lag relationship between SST and precipitation in a coupled reanalysis using TAO-TRITON data, 2020 AGU Fall Meeting, 2020年12月, アメリカ, サンフランシスコ
7. Subramanian, A., Y. Fujii, Y. Takaya, et al., Impact of ocean observation systems on ocean analyses and subseasonal forecasts in the Indo-Pacific region, 2020 AGU Fall Meeting, 2020年12月, アメリカ, サンフランシスコ
8. Kawai, H., S. Yukimoto, T. Koshiro, N. Oshima, T. Tanaka, H. Yoshimura, and R. Nagasawa, Significant Improvement of Cloud Representation in MRI-ESM2, AGU Fall Meeting 2020, 2020年12月, 米国, virtual
9. 眞木貴史, 田中泰宙, 関山剛, 大島長, 小木昭典, 弓本桂也, 鎌田茜, 大竹潤, 齋藤篤思, 上清直隆, Recent DSS related activities at the Japan Meteorological Agency and Meteorological Research Institute, 日中韓黄砂共同研究第一作業部会会合, 2020年10月, (オンライン)
10. Tanaka, K., K. Kutsuwada, T. Miyama, T. Toyoda, B. Casareto, and M. Omori, Toward

- understanding interaction between coastal circulations and Kuroshio current, CSK-2 Science Plan, 2020年8月, N/A
11. Toyoda, T., N. Kimura, L. S. Urakawa, H. Tsujino, H. Nakano, K. Sakamoto, and G. Yamanaka, Optimization of dynamic parameters of sea ice models based on satellite-derived sea ice velocity data, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, 2020年7月, 千葉市
 12. Ganeshi, N., M. Mujumdar, R. Krishnan, M. Goswami, Y. Takaya and T. Terao, Understanding the impact of soil moisture variations on temperature extremes over the Indian region, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
 13. Takaya, Y., Y. Kosaka, M. Watanabe, S. Maeda, N. Saito, I. Ishikawa, Rethinking the ENSO-monsoon relationship in light of trans-basin interactions, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
 14. Oshima, N., S. Yukimoto, M. Deushi, T. Koshiro, H. Kawai, T. Y. Tanaka, and K. Yoshida, Effective Radiative Forcing Estimates of Anthropogenic Aerosols in MRI-ESM2, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
 15. Taichu Y Tanaka, Johannes Flemming, Alexander Baklanov, Greg Carmichael, James H. Crawford, Vincent-Henri Peuch, Guy Brasseur, Ranjeet Sokji, Sean Khan, Slobodan Nickovic, Xiao-ye Zhang, Christopher Gan, Kobus Pienaar, Nathalie Laure Roebbel, Radenko Pav, Towards a globally harmonized air quality forecasting: GAFIS, a new WMO-GAW initiative, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
 16. Taichu Y Tanaka, Keiya Yumimoto, Mayumi Yoshida, Hiroshi Murakami, Takashi M. Nagao, Megumi Okata, Aerosol data assimilation experiment using GCOM-C SGLI aerosol product, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
 17. 吉田康平, Do sudden stratospheric warmings boost convective activity in the tropics?, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
 18. 碓氷典久, 広瀬成章, 坂本圭, 藤井陽介, 高野洋雄, 山中吾郎, Development of a high-resolution ocean data assimilation system and evaluation of ocean observing systems, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
 19. Imada, Y., H. Tatebe, M. Ishii, Y. Chikamoto, M. Mori, M. Arai, S. Kanae, M. Watanabe, and M. Kimoto, Predictability of two flavors of El Nino and statistical downscaling by SVD analysis using the MIROC5 seasonal prediction system, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
 20. Ishibashi, T., Observation impact study in global numerical weather prediction, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
 21. Ishibashi, T., Data assimilation of lightning observation data for global numerical weather prediction, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
 22. Fujii, Y., C. Kobayashi, I. Ishikawa, and Y. Takaya, Enhanced correlations between SST and precipitation in the weather time scale represented by a coupled atmosphere-ocean data assimilation system, 日本地球惑星科学連合 2020年大会, 2020年7月, オンライン
 23. Tsujino, H., A. Obata, S. Yukimoto, M. Hosaka, T. Tanaka, K. Toyama, T. Koshiro, S. Urakawa, H. Nakano, Evaluation of carbon cycles in a suite of CMIP6-C4MIP experiments by Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0 (MRI-ESM2.0), JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, 千葉県千葉市
 24. Kawai, H., and T. Koshiro, Stability Index for Marine Low Cloud Cover over the Mid-latitudes, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
 25. Jackson, L. C., C. Dubois, G. Forget, K. Haines, M. Harrison, D. Iovino, A. Kohl, D. Mignac, S. Masina, K. A. Peterson, C. G. Piecuch, C. Roberts, J. Robson, A. Storto, T. Toyoda, M. Valdivieso, C. Wilson, Y. Wang, and H. Zuo, The mean state and variability of the North Atlantic circulation: a perspective from ocean reanalyses, EGU General Assembly

2020, 2020年5月, オーストラリア, ウイーン

26. 高谷祐平, 高野洋雄, 気象庁における波浪結合の開発
(続報その1), 海洋波および大気海洋相互作用に関するワークショップ, 2021年3月, オンライン
27. 伊藤耕介, 藤井陽介, 4次元データ同化による解析インクリメントの構造はどう決まるのか?, 第11回データ同化ワークショップ, 2021年2月, オンライン
28. 川合秀明, 総説: 海上の下層雲の概要、気候モデルにおけるそのパラメタリゼーション, エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会, 2021年2月, オンライン
29. 川合秀明, 何が地球の将来の温度を決めるのか?, 地球環境講演会, 2021年1月, オンライン
30. 広瀬成章, 碓氷典久, 坂本圭, 高野洋雄, 山中吾郎, 気象庁領域海況予測システム(日本沿岸海況監視予測システム)の開発と利用, 研究集会「宇宙環境の理解に向けての統計数理的アプローチ」, 2020年12月, オンライン
31. 豊田隆寛, 中野英之, 相木秀則, 尾形友道, 福富慶樹, 菅野湧貴, 浦川昇吾, 坂本圭, 山中吾郎, 名倉元樹, ENSOのエネルギーフローの海洋再解析からの診断, 黒潮/親潮続流域の力学過程とその学際的応用, 2020年12月, 岩手県大槌町
32. 伊藤耕介, 山田広幸, 栗原晴子, 宮田龍太, 平野創一朗, 坂本圭, 豊田隆寛, 大気海洋生態系結合モデルにより再現された2018年台風第24号通過に対する海洋応答, 日本海洋学会2020年度九州沖縄地区合同シンポジウム, 2020年12月, 沖縄県中頭郡西原町
33. 碓氷典久, 広瀬成章, 東シナ海海面水温と黒潮変動の関係, 2020年度九州沖縄地区合同シンポジウム「南西諸島近海における大気・海洋・生態系」, 2020年12月, 沖縄県中頭郡西原町
34. 川合秀明, 地球温暖化によって将来の気候はどう変わるのか?, 船橋市・オンライン市民公開講座, 2020年12月, オンライン
35. 豊田隆寛, 中野英之, 相木秀則, 尾形友道, 福富慶樹, 菅野湧貴, 浦川昇吾, 坂本圭, 山中吾郎, 名倉元樹, 海洋再解析を用いた ENSO のエネルギーフロー診断, 日本海洋学会2020年度秋季大会, 2020年11月, (オンライン)
36. 中野英之, 松村義正, 辻野博之, 坂本圭, 浦川昇吾, 豊田隆寛, 山中吾郎, 粒子追跡法と渦解像モデルを用いた、東経137度に到達する水塊に対する中規模渦の働き, 日本海洋学会2020年度秋季大会, 2020年11月, オンライン
37. 牛島悠介, 辻野博之, 坂本圭, 気象研究所地球システムモデルMRI-ESM2.0における日本沿岸の海面水位変動とその変動要因, 日本海洋学会2020年度秋季大会, 2020年11月, オンライン
38. 辻野博之, 小室芳樹, 浦川昇吾, 海洋モデル相互比較プロジェクトと日本からの貢献, 日本海洋学会2020年度秋季大会, 2020年11月, オンライン
39. 藤井陽介, 国際共同研究プロジェクト OceanPredict について, 日本海洋学会2020年度秋季大会, 2020年11月, オンライン
40. 尾形友道, 相木秀則, 豊田隆寛, 結合モデルの ENSO に伴う海洋波動のエネルギー経路同定, 日本海洋学会2020年度秋季大会, 2020年11月, (オンライン)
41. 和川拓, 井桁庸介, 坂本圭, 春季における佐渡島沖合域の上層低塩水の形成過程, 日本海洋学会2020年度秋季大会, 2020年11月, オンライン
42. 唐木達郎, 坂本圭, 木村伸吾, 笠井亮秀, 気象庁海洋大循環モデルを用いたニホンウナギの仔魚輸送実験, 日本海洋学会2020年度秋季大会, 2020年11月, オンライン
43. 坂本圭, 中野英之, 浦川昇吾, 豊田隆寛, 山中吾郎, 辻野博之, 解像度2km日本沿岸モデルを用いた沿岸滞留時間の推定(2), 日本海洋学会2020年度秋季大会, 2020年11月, オンライン
44. 浅井博明, 檜垣将和, 平原幹俊, 桜井敏之, 小林熙, 碓氷典久, 坂本圭, 広瀬成章, 気象庁現業海洋データ同化・予測システムの更新, 日本海洋学会2020年度秋季大会, 2020年11月, オンライン
45. 広瀬成章, 碓氷典久, 坂本圭, 高野洋雄, 山中吾郎, 2km高解像度現業海況システムを用いた

- 1971年9月異常潮位の再現実験とその要因, 日本海洋学会 2020年度秋季大会, 2020年11月, オンライン
46. 山中吾郎, 広瀬成章, 坂本圭, 碓氷典久, 高野洋雄, JPNシステムによる海洋情報の利活用, 日本海洋学会 2020年度秋季大会, 2020年11月, オンライン
 47. 眞木貴史, 田中泰宙, 関山剛, 大島長, 梶野瑞王, 気象研究所地球システムモデルを用いた黄砂発生量予測, 大気化学討論会, 2020年11月, (オンライン)
 48. 大島長, 行本誠史, 出牛 真, 神代 剛, 川合秀明, 田中泰宙, 吉田康平, 気象研究所地球システムモデルを用いた人為起源気体とエアロゾルによる有効放射強制力の推定, 第25回大気化学討論会, 2020年11月, 名古屋市
 49. 田中泰宙, 辻野博之, 足立恭将, 小畑淳, 中野英之, 保坂征宏, 神代剛, 行本誠史, 地球システムモデルによるCMIP6 実験での大気CO₂分布再現性の評価, 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 50. 石橋俊之, 雷光観測の全球同化(序), 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 51. 川合秀明, 神代剛, 亜熱帯下層雲の放射冷却は夏季の亜熱帯高気圧を強化するか?, 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 52. 眞木貴史, 近藤圭一, 中村貴, 衛星観測データバイアス補正による炭素収支解析への影響, 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 53. 千葉丈太郎, 川合秀明, 層積雲スキーム改良によるSST-SW フィードバックの改善, 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 54. 酒井哲, 内野修, 永井智広, 吉田智, 小司禎教, 大島長, 眞木貴史, 森野勇, Richard Querel, Ben Liley, ニュージーランド・ローダー上空高度24-31 kmで観測された非球形粒子と低濃度オゾン, 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 55. 川合秀明, 神代剛, 遠藤洋和, 荒川理, 全球の海霧の分布とその温暖化時の変化, 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 56. 高谷祐平, 齊藤直彬, 石川一郎, ENSO-アジアモンスーン関係の再考, 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 57. 酒井 哲, 内野修, 永井智広, 吉田智, 小司禎教, 大島長, 眞木貴史, 森野勇, Richard Querel, Ben Liley, ニュージーランド・ローダー上空高度24-31 kmで観測されたオーストラリア森林火災起源と考えられる非球形粒子と低濃度オゾン, 第38回レーザーセンシングシンポジウム, 2020年9月, 日本
 58. 藤井陽介, 広瀬成章, 豊田隆寛, 高槻靖, 石川一郎, 足立恭将, 杉本裕之, 小森拓也, 気象予測での海洋データ同化システムの利用に向けて, 第24回データ同化夏の学校, 2020年8月, オンライン, オンライン
 59. 石橋俊之, 数値天気予報のための全球大気解析の高精度化に関する研究, 神戸大学惑星科学研究センターセミナー, 2020年8月, リモート
 60. 小杉 如央, 広瀬 成章, 豊田 隆寛, 石井 雅男, 栄養塩をトレーサーとした日本海中層水に含まれる淡水起源の推定, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
 61. 関山剛, 弓本桂也, 眞木貴史, 田中泰宙, 竹村俊彦, 多波長光学イメージャを用いた大気エアロゾルの監視, 同化予測および再解析プロダクトの作成, 日本地球惑星科学連合 2020年大会, 2020年7月, オンライン
 62. 千葉丈太郎, 川合秀明, 層積雲スキーム改良によるSST-SW フィードバックの改善, 日本気象学会 2020年度春季大会, 2020年5月, 神奈川県川崎市
 63. 石橋俊之, 雷光観測の全球同化(序), 日本気象学会 2020年度春季大会, 2020年5月, オンライン

受賞・報道・アウトリーチ活動等
報道発表

- ・ きめ細かな海流・海水温の情報提供を開始 ～潮位情報の改善～、令和2年10月23日、気象庁

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：2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 部長）

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

〔気象予報研究部〕○藤田 匡、橋本明弘、林 修吾、渡邊俊一

〔気象観測研究部〕山田芳則

〔台風・災害気象研究部〕和田章義、小野耕介

（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

〔気象予報研究部〕○毛利英明、水野吉規、安齋太朗、守永武史

（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

〔気象予報研究部〕○大河原望、庭野匡思、谷川朋範

〔気候・環境研究部〕保坂征宏

（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

〔気象予報研究部〕○中川雅之、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

〔気象予報研究部〕○財前祐二、折笠成宏、田尻拓也、橋本明弘

〔全球大気海洋研究部〕足立光司、梶野瑞王

〔応用気象研究部〕川端康弘

研究の動機・背景

（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。

引き続き同分科会では、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、大気のよう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付く

わけではないことが分かっている。これは「グレーズーン問題¹⁾」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んだ結果、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。

¹⁾グレーズーン問題

物理過程パラメタリゼーションを必要とする現象とそうでない現象が混在する解像度ではパラメタリゼーションの適用方法が難しく、予測精度が上がらない問題

(副課題 2)

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)

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)

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。

研究の成果の到達目標**(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。

(副課題 2)

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する。

(副課題 3)

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、積雪モデルや海氷モデルの開発・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)

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ー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する。

(副課題 5)

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の基礎データを得る。また、雲生成チェンバー等の装置を用いた実験やモニタリングを行い、各種大気エアロゾルの CCN 能、IN 能についてのデータを得る。これらの実験結果や測定結果を、新たに開発する詳細微物理モデルによって、解析し、パラメータ化する。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う。

令和2年度の研究計画**(副課題 1)**

- ①引き続き、異なる空間解像度の気象庁非静力学モデル（JMA-NHM）あるいは気象庁現業領域モデル（asuca）による再現実験を行い、現行モデルや現業モデルの改良点の検討を行う。
- ②副課題2～5の各種物理過程研究の成果を高解像度モデルに組み込み、予備的な実験によってその性能を調査する。
- ③バルク法やビン法雲微物理モデルによる降水・降雪過程モデルの改良や高度化を行う。
- ④物理過程の高度化や改良を行うとともに、対流雲の再現性を向上させる。
- ⑤高解像度モデルによる発雷予測手法の検討および観測との比較検証を行い、発雷メカニズムに基づいた発雷予測の改良を行う。
- ⑥asuca への移行準備を進める。
- ⑦湿潤 LES 開発のための実験を行い、モデルの問題点等を明らかにする。
- ⑧広領域高解像度モデルを用いたフィリピン付近を対象とした予備的な実験を実施し、予備的な検証に着手する。
- ⑨熱帯や亜熱帯域での物理過程の改良を検討する。
- ⑩NHM の高度化と利用促進のために、様々な状況でのモデル計算に資するための力学過程・物理過程の最適化、外部機関での利用を念頭に置いたツールの整備を行う。

（副課題2）

- ①LES や DNS を用いて安定・不安定・中立な境界層の数値計算を行い、接地境界層における乱流輸送についてデータを解析する。
- ②気象研風洞において安定・不安定・中立な境界層の実験を行なってデータを蓄積しつつ、中立・安定な場合について解析を行う。
- ③気象研露場において接地境界層の通年観測を行なってデータを蓄積しつつ、乱流輸送と大気安定度等との関係について解析を行う。

（副課題3）

- 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・積雪連続観測を継続すると同時に、現地で取得する積雪サンプルから光吸収性不純物濃度を測定する。上記3地点を含む国内外の様々な場所における気象・雪氷現地観測を実施して、積雪・海氷等の物理過程の理解の深化、放射理論・観測等に基づく詳細衛星リモートセンシングアルゴリズムの開発を進める。
- 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
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、SGLI を搭載する GCOM-C 等の極軌道衛星、マイクロ波衛星等の衛星データについて、雪氷物理量の監視のためのアルゴリズムの改良を行う。
- 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 の高度化・日本周辺および極域での領域気候モデル(NHM-SMAP) 計算を実施し、地球システムモデルの結果とともにその検証を行い、修正すべき課題を明らかにするとともに、改良を図る。

（副課題4）

- ①積雲対流スキームの開発
理想環境や鉛直1次元モデルによる実験を行う。また3次元モデルでの単発実験と事例調査、従来の積雲対流スキームとの比較による性能評価に着手する。
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
3次元モデルでの単発実験と事例調査を引き続き行う。またサイクル実験による性能評価を進める。
必要に応じて浅い対流、境界層スキームの改良を行う。
- 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う。
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う。

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

雲の水平非一様性により精緻な雲オーバーラップ等を実現する仕組みの構築を引き続き行う。理想実験による動作確認に着手する。

必要に応じて観測データ・再解析データによる検証・参照利用を行う。

(副課題 5)

- ①雲生成チェンバーを用いて、代表的な内部混合粒子の CCN 特性について、予備実験を行う。
- ②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。
- ③詳細微物理モデルを開発・改良し、過去に得られた室内実験や観測データと比較可能にする。
- ④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、物理化学特性を調査する。
- ⑤バーチャルインパクトや電子顕微鏡、冷却ステージ付き光学顕微鏡等を用いて有効な IN を調査する。

令和2年度の研究成果

成果の概要

(1) 課題全体

5年計画の研究の実施に必要な準備や環境整備は完了し、徐々に具体的な研究成果をあげつつある。以下に述べるように5つの副課題それぞれについて今後につながる研究成果をあげており、概ね当初の計画に沿って実施できている。

(2) 副課題

(副課題 1)

- ・1km以下の水平格子間隔での線状降水帯の理想化実験に取り組んでいる。海風前線の進行や風の収束の形成、これに伴う降水システムの発達について、解像度、予報モデル(asuca, NHM)の比較により分析を進めている。
- ・気象研究所新スパコンでの asuca 利用のための実験環境構築を行った。
- ・NHMの気象研究所新スパコンでの実験環境整備を行った。メソ解析 asuca-Var による初期値に対応した NHM の前処理ツールを整備した。
- ・実験環境を整備した asuca, NHM による系統的实验によってモデル解像度と予測精度との関係の調査に取り組んでいる。
- ・NHM や asuca により極端気象(線状降水帯・突風)や局地現象(局地風・空港付近の乱気流)の実事例の再現実験や予報実験を行い、グレーゾーンを越えた超高解像度の数値モデルの有用性を確かめている。
- ・激しい気象現象のモデルによる再現性の検討として、日本海側での大雪事例について、水平格子間隔1kmの数値予報により、JPCZの動きと降雪粒子の分布特性の対応を調査し、観測結果と整合していることを確認した。また、素過程追跡モデルにより、雪、霰生成への各過程の寄与率を調べ、JPCZ内外での傾向の違いが観測結果と一致していることを確認した。
- ・大雪事例について、雲核、氷晶核特性の効果を想定して、降水粒子生成率を変えた感度実験を行い、降雪量への影響を調査した。降雪量、霰寄与率について、雲核の効果(雲粒からの雨滴生成)への依存性がみられた。
- ・積乱雲に伴う激しい気象現象の分析として、水平格子間隔1kmの数値予報モデルによる水物質の予測と発雷観測の対応について、平成29年7月九州北部豪雨事例と平成30年7月豪雨事例による調査を進めた。
- ・水平格子間隔5km, 1kmでヒマラヤ域における降水種別の標高特性の調査、衛星降水プロダクトとの比較を行った。今後さらに高解像度で、地形表現の効果に着目し調査する。
- ・複数のフェーズドアレイレーダー観測によるドップラー速度から、積乱雲に伴う3次元風の構造解析を行い、活発な対流を伴う積乱雲の特徴を分析した。今後の対流活動のメカニズムの分析や数値予報による再現性の調査の基礎となる結果が得られた。
- ・2019年にフィリピンに上陸した台風第28号及び第29号について、NHMを元にした大気波浪海洋結

合モデルを用いて数値シミュレーション及び雨・雪・あられの蒸発率に関する感度実験を実施し、得られた結果をマイクロ波衛星によるプロダクトと比較した。蒸発を考慮しない場合は1時間降水分布は台風域内に集中し、考慮した場合はレインバンドがより明瞭となり、非対称的な分布が顕在化することがわかった。

(副課題2)

昨年度の基盤整備に引き続き、①数値計算・②風洞実験・③野外観測の各分野において本格的な研究を開始した。接地境界層について以下の学術的な成果が既に得られ、論文として発表している。

- ②風速変動の高次統計量について中立時に平均風速と同様な対数則が成立することを風洞実験から明らかにした (Mouri et al. 2020)。
- ②風速変動の2次統計量である分散について不安定時に中立時と同様な対数則が成立することを風洞実験から明らかにした (守永ほか 2020)。
- ③監視カメラの画像からアメダス露場の積雪深を推定するため画像補正のアルゴリズムを開発しCGによる性能評価を行った (水野 2020)。
- ③水田におけるエネルギー収支を数値モデル化し二酸化炭素濃度の上昇に対する潜熱フラックスの応答を調べた (Ikawa et al. 2021 印刷中)。

(副課題3)

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。
- ・地上可搬型全天分光日射計データから、積雪粒径、光吸収性不純物濃度を高精度に推定するための光散乱積雪粒子モデルを開発した。
- ・様々な雪氷面を対象とした分光反射測定装置の開発を行い、積雪や海氷表面の分光反射特性・偏光特性を取得した。
- ・積雪の偏光特性について、特に普遍的な性質に関する新たな知見を得るとともに、偏光リモートセンシングの新たな可能性を示唆する結果が得られた。
- ・海氷下の分光透過率測定から海氷藻類のバイオマスを推定する手法開発に貢献した。
- ・積雪が結氷初期の海氷成長に及ぼす影響に関する観測的研究に貢献した。

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

- ・積雪物理量のリモートセンシングの高度化を目的に、①で開発した光散乱積雪粒子モデルをMODIS、ひまわり8号イメージャに適用し、衛星リモートセンシングアルゴリズムの改良を行った。
- ・上記手法をSGLIにも応用し、JAXA GCOM-C/SGLIの公式プロダクトに定義されている粒径物理量の高度化を行った。
- ・偏光リモートセンシングの可能性を調査すること目的に、新たに大気-積雪系放射伝達モデルを開発した。

③雪氷物理過程モデルの高度化と活用

- ・日本周辺および極域での領域モデル計算を実施し、上記観測データなども利用してモデル精度評価を随時実施した。

(副課題4)

(副課題4)

①積雲対流スキームの開発

- ・グレーズーンに対応した積雲対流スキームの構築に向け、引き続き文献調査や関係者との議論を行っている。また asuca に整備されている warm bubble, TRMM-LBA 理想実験を実行した。

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るため、GSM2003 に小森 (2009) に基づく浅い積雲対流スキームを導入して予測への影響を調査している。これまでの改良により、境界層の構造が現実大気に近づき放射フラックスのバイアスが減少する一方、対流圏下層の気温の予測精度が悪化していた。浅い積雲対流スキームの効果が十分でないことが原因と考えられる。成果は学会で発表するとともに、開発管理サーバのチケットで報告している。

③全球モデルにおける雲微物理過程の改良

- ・ 全球気候モデル、全球数値予報モデルの下層雲のパラメタリゼーションに関する招待レビュー論文 (JMSJ) を出版した。下層雲の特徴や性質、そのパラメタリゼーションのコンセプトや困難さも丁寧に記述しており、学生等も含め、初心の研究者らが下層雲のパラメタリゼーションに関わる際の導入となる文献を目指した。
- ・ MRI-ESM2 における南大洋などの放射バイアスと熱帯降水帯の関係を調査した。南大洋の放射バイアスが大きいほど南半球の熱帯降水帯の表現が悪化していくという明瞭な関係が示され、WGNE Blue Book で出版した。
- ・ GSAMI705、MRI-ESM2 の上層雲を比較調査した。放射収支、雲放射効果、雲氷量、雲量などの比較を行い、どのような違いがあるかを明らかにした。
- ④ 全球モデルにおけるエアロゾル雲相互作用の高度化
 - ・ エアロゾルの雲に対する影響について行ってきた研究成果をまとめ、庁内での認識の共有を図るべく、エアロゾル・雲に関する臨時の勉強会を開催し、発表を行った。
- ⑤ 放射スキームの改良
 - ・ 全球モデルの放射計算で多重散乱計算を行う際に必要となる「各鉛直サブカラムでの雲の有無とその雲水量を格子点 (格子平均) の雲量と雲水量の値から決定する部分 (cloud generator)」のコーディングと動作確認を行った。前もって雲オーバーラップの仮定から別途診断しておいた全雲量 (曇天域) を用いて曇天域のみをサブカラムに分割する高速で効率的な Cloud Generator の設計についても行った。その過程で雲オーバーラップの仮定をサブグリッドにまで適用するかしないかで診断された全雲量の値に大きな差が生じることも確認した。それらの調査結果は開発管理サーバのチケット上で報告した。
 - ・ 全球モデルの放射計算における氷雲光学特性診断式と氷雲有効サイズ診断式について文献調査の上より信頼性の高い方法へと見直し、鉛直 1 次元モデルによる理想実験と 3 次元全球大気モデルによる 1 年積分実験でその影響を調査した。前者 (後者) により氷雲の放射強制力が弱まり (強まり) 対流圏が冷える (温まる) こと、両者を組み合わせることで前者の効果が後者の効果により緩和されることが確認された。これらの調査結果やソースコードの変更点は開発管理サーバのチケット上で報告した。

(副課題 5)

- ・ つくばでの地上モニタリング観測に関する解析結果をとりまとめ、実大気エアロゾルの雲核能・氷晶核能の季節変動等を SOLA 誌で発表した。
- ・ UAE での夏季対流雲を対象とした航空機観測の事例解析をとりまとめ、雲微物理構造やエアロゾルの雲核・氷晶核特性を SOLA 誌で発表した。
- ・ オンライン NHM-Chem に鉱物ダスト、バイオエアロゾル、ブラックカーボンの氷晶核形成過程を実装し、平成 30 年 7 月豪雨を対象とした数値実験を行い、降水や雲物理過程に対する鉱物ダストの影響を評価した。
- ・ 詳細微物理モデルの評価論文を Geosci. Model Dev. 誌に投稿した。
- ・ 北極エアロゾル試料を採取した。また、これまでの試料 (アマゾン及び北極) の電子顕微鏡分析結果をまとめ、Atmospheric Chemistry and Physics 誌にそれぞれ論文を発表した。
- ・ 東京における視程とエアロゾルの関係について調査し、天気誌に論文を発表した。
- ・ つくば上空における大気エアロゾルの代表的 IN 能を定量化するため、雲生成チェンバー実験の事例解析を進め、黄砂飛来時などの顕著なイベントとの比較評価を進めた。
- ・ (大気エアロゾルで有効に CCN として働く) サブミクロン粒子の吸湿度を精度良く同定するため、大気エアロゾル代替粒子の発生・計測手法の改良を試み、初期雲粒粒径分布について詳細 BOX モデルとの比較解析を実施した。

計画に対する進捗度及び変更点

(1) 当初計画に対する進捗度 (計画した線表通りに研究が進捗しているかを記述)

概ね当初の計画通り進んでいる。

(2) 当初計画から変更した点 (研究手法の変更点など)

(副課題 2)

- ・ 風洞実験においては大型風洞の床面冷却用冷凍機が年度末まで修理中であったため、小型風洞にお

いて安定・不安定成層の実験を行った。

本課題の成果から施策や他の研究への波及状況

(外部機関や所内外の研究課題への波及効果)

(副課題2)

- ・野外観測においては、本庁気象技術開発室と共同で監視カメラの画像からアメダス露場の積雪深を推定するため画像補正のアルゴリズムを開発し（R1～R2年度技術開発課題）その詳細を測候時報に報告した（水野2020）。
- ・野外観測において得られたデータは本庁気象技術開発室に提供され、同室の風ナウキャストの開発に活用されている。同データは課題D4（GPSによる土壌水分観測）にも提供された。

(副課題3)

- ・本庁の解析積雪深・解析降雪量プロダクト精度改善のため、気象研究所で開発した積雪変質モデル（SMAP）を提供した。

(副課題4)

- ・全球モデルにおける氷雲光学特性診断式と氷雲有効サイズ診断式の見直しについては、既にソースコードを数値予報課に提供しており、現業モデルへの適用に向けた確認が行われている。
- ・Kawai(2017)の層積雲スキームは本庁で次期季節予報システムへの適用が準備されており、ソースの移植等の協力を行った。

(副課題5)

- ・エアロゾル・雲の航空機観測解析及び数値シミュレーションによる再現実験は、アラブ首長国連邦（UAE）助成金プロジェクト終了後も継続して実施し、航空機観測データや雲の微物理構造に関する多くの知見を得、数値モデルの評価に貢献した。また、大学が所有する数値モデルの検証改良にも貢献している。航空機観測に関する成果内容は、原著論文に限らず国際的な研究フォーラム（オンライン）でも発表し、降水強化に関する研究コミュニティに向けてアピールした。

他省庁予算及び共同研究等からの反映状況

(他省庁予算等研究課題から本課題への波及効果)

(1) 他省庁予算

(副課題3)

地球環境保全試験研究費「光吸収性エアロゾルの監視と大気・雪氷系の放射収支への影響評価 ―地球規模で進行する雪氷圏融解メカニズムの解明に向けて―」（平成29-令和3年度、研究代表者：大河原望）による以下の成果を活用した。

- ・札幌・長岡における気象・雪氷観測を継続した。札幌においては、新規にOPCを設置し、大気中におけるPM2.5の挙動を従来よりも正確に把握する試みに着手した。
- ・札幌において過去16年間に取得した地上気象・放射・雪氷観測データを公開した。
- ・2018年にグリーンランドで取得した雪氷観測データを公開した。
- ・新たに開発した積雪粒子形状モデルを用いて、しきさい、ひまわり8号観測データによる、雪氷衛星プロダクトの算出を開始した。
- ・NHM-Chem-SMAPによる日本域計算と感度実験を実施し、その精度評価を行った。
- ・日本全域において、オフラインでSMAPを面的に駆動して、積雪域と積雪面積の変化に光吸収性不純物が与える定量的影響を調べた。
- ・光吸収性雪氷微生物がグリーンランド北西部のカナック氷帽の雪氷アルベド変化に与える影響を評価することに成功した。

(副課題5)

- ・環境研究総合推進費「地球温暖化に関わる北極ブラックカーボンとダスト粒子の動態と放射効果」と連動して、北極域のエアロゾルについての調査を実施し、北極域ダストの氷晶核能等について多くの知見を得た。

(2) 共同研究

なし。

(3) 公募型共同利用による研究

なし。

(4) 科学研究費補助金

(副課題2)

- ・風洞実験にかかる論文 Mouri et al. (2020) は東北大との科研費 19K03967 「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」(H29年度-R01年度)の成果の一環でもある。

今後の課題

新型コロナウイルスの研究活動への影響に注視する必要がある。

研究成果リスト

(1) 査読論文：40件

1. Ikawa, H., T. Kuwagata, S. Haginoya, Y. Ishigooka, K. Ono, A. Maruyama, H. Sakai, M. Fukuoka, M. Yoshimoto, S. Ishida, C. P. Chen, T. Hasegawa, and T. Watanabe, 2021: Heat-Mitigation Effects of Irrigated Rice-Paddy Fields Under Changing Atmospheric Carbon Dioxide Based on a Coupled Atmosphere and Crop Energy-Balance Model. *Boundary-Layer Meteorology*, **179**, 447-476.
2. Adachi, K., Oshima, N., Ohata, S., Yoshida, A., Moteki, N., and Koike, M., 2021: Compositions and mixing states of aerosol particles by aircraft observations in the Arctic springtime, 2018. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **21**, 3607-3626.
3. Junshi Ito, Hiroshige Tsuguchi, Syugo Hayashi, and Hiroshi Niino, 2021: Idealized High-Resolution Simulations of a Back-Building Convective System that Causes Torrential Rain. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **78**, 117-132.
4. Sugiyama, S. et al., 2021: Rapidly changing glaciers, ocean and coastal environments, and their impact on human society in the Qaanaaq region, northwestern Greenland. *Polar Science*.
5. Menard, C. B. et al., 2021: Scientific and human errors in a snow model intercomparison. *Bulletin of the American Meteorological Society*, E61-E79.
6. Hayashi, S., A. Umehara, N. Nagumo, and T. Ushio, 2021: The relationship between lightning flash rate and ice-related volume derived from dual-polarization radar. *Atmospheric Research*, **248**, 105166.
7. Niwano, M., Yamaguchi, S., Yamasaki, T., and Aoki, T., 2020: Near-surface snow physics data from a dog-sledge traverse expedition in the northwest Greenland ice sheet during 2018 spring. *Polar Data Journal*, **4**, 133-144.
8. Vandecrux, B. et al., 2020: The firn meltwater Retention Model Intercomparison Project (RetMIP): evaluation of nine firn models at four weather station sites on the Greenland ice sheet. *The Cryosphere*, **14**, 3785-3810.
9. Fettweis, X. et al., 2020: GrSMBMIP: intercomparison of the modelled 1980-2012 surface mass balance over the Greenland Ice Sheet. *The Cryosphere*, **14**, 3935-3958.
10. Kubota, T., H. Kuroda, M. Watanabe, A. Takahashi, R. Nakazato, M. Tarui, S. Matsumoto, K. Nakagawa, Y. Numata, T. Ouchi, H. Hosoi, M. Nakagawa, R. Shinohara, M. Kajino, K. Fukushima, Y. Igarashi, N. Imamura, G. Katata, 2020: Role of advection in atmospheric ammonia: A case study at a Japanese lake basin influenced by agricultural ammonia sources. *Atmospheric Environment*, **243**, 117856.

11. Kawai, H., and S. Shige, 2020: Marine low clouds and their parameterization in climate models. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **98**, 1097–1127.
12. Kleinman L. I., Sedlacek III A. J., Adachi K., Buseck P. R., Collier S., Dubey M. K., Hodshire A. L., Lewis E., Onasch T. B., Pierce J. R., Shilling J., Springston S. R., Wang J., Zhang Q., Zhou S., and Yokelson R. J., 2020: Rapid evolution of aerosol particles and their optical properties downwind of wildfires in the western US. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 13319.
13. Orikasa, N., A. Saito, K. Yamashita, T. Tajiri, Y. Zaizen, T.-H. Kuo, W.-C. Kuo, and M. Murakami, 2020: Seasonal Variations of Atmospheric Aerosol Particles Focused on Cloud Condensation Nuclei and Ice Nucleating Particles from Ground-Based Observations in Tsukuba, Japan. *SOLA*, **16**, 212–219.
14. Yoshizue M, Taketani F, Adachi K, Iwamoto Y, Tohjima Y, Mori T, Miura K, 2020: Detection of Aerosol Particles from Siberian Biomass Burning over the Western North Pacific. *Atmosphere*, **11**, 1175.
15. Adachi, K., Oshima, N., Gong, Z., de Sá, S., Bateman, A. P., Martin, S. T., de Brito, J. F., Artaxo, P., Cirino, G. G., Sedlacek III, A. J., and Buseck, P. R., 2020: Mixing states of Amazon basin aerosol particles transported over long distances using transmission electron microscopy. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 11923–11939.
16. Orikasa, N., M. Murakami, T. Tajiri, Y. Zaizen, and T. Shinoda, 2020: In Situ Measurements of Cloud and Aerosol Microphysical Properties in Summertime Convective Clouds over Eastern United Arab Emirates. *SOLA*, **16**, 185–191.
17. Ge, B., S. Itahashi, K. Sato, D. Xu, J. Wang, F. Fan, Q. Tan, J. S. Fu, X. Wang, K. Yamaji, T. Nagashima, J. Li, M. Kajino, H. Liao, M. Zhang, Z. Wang, M. Li, J.-H. Woo, J. Kurokawa, Y. Pan, Q. Wu, X. Liu, and Z. Wang, 2020: Model Inter-Comparison Study for Asia (MICS-Asia) phase III: Multi-model comparison of reactive nitrogen deposition over China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 10587–10610.
18. Dragović, S., M. Yamauchi, M. Aoyama, M. Kajino, J. Petrović, M. Čujić, R. Dragović, M. Đorđević, J. Bór, 2020: Synthesis of studies on significant atmospheric electrical effects of major nuclear accidents in Chernobyl and Fukushima. *Science of Total Environment*, **733**, 139271.
19. Yutaka Kurosaki, Sumito Matoba, Yoshinori Iizuka, Masashi Niwano, Tomonori Tanikawa, Takuto Ando, Akira Hori, Atsushi Miyamoto, Shuji Fujita, and Teruo Aoki, 2020: Reconstruction of sea ice concentration in northern Baffin Bay using deuterium excess in a coastal ice core from the northwestern Greenland Ice Sheet. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, **125**.
20. Dhaka, S. K., Chetna, V. Kumar, V. Panwar, A. P. Dimri, N. Singh, P. K. Patra, Y. Matsumi, M. Takigawa, T. Nakayama, K. Yamaji, M. Kajino, P. Misra, and S. Hayashida, 2020: PM_{2.5} diminution and haze events over Delhi during the COVID-19 lockdown period: an interplay between the baseline pollution and meteorology. *Scientific Reports*, **10**, 13442.
21. Oshima, N., S. Yukimoto, M. Deushi, T. Koshiro, H. Kawai, T. Y. Tanaka, and K. Yoshida, 2020: Global and Arctic effective radiative forcing of anthropogenic gases and aerosols in MRI-ESM2.0. *Progress in Earth and Planetary Science*, **7**, 38.
22. Wingspan, P., Nomura, D, T. Toyota, T. Tanikawa, K. M. Meiners, T. Ishino, T. P. Tamura, M. Tozawa, Y. Nosaka, T. Hiratake, A. Ooki, and S. Aoki, 2020: Using under-ice hyperspectral transmittance to determine land-fast sea-ice algal biomass in Saroma-ko Lagoon, Hokkaido, Japan. *Annals of Glaciology*, 1–10.
23. Vandecrux, B., Fausto, R. S., van As, D., Colgan, W., Langen, P. L., Haubner, K., Ingeman-Nielsen, T., Heilig, A., Stevens, C. M., MacFerrin, M., Niwano, M., Steffen, K., Box, J. E., 2020: Firn cold content evolution at nine sites on the Greenland ice

- sheet between 1998 and 2017. *Journal of Glaciology*.
24. Tanikawa, T., K. Kuchiki, T. Aoki, H. Ishimoto, A. Hachikubo, M. Niwano, M. Hosaka, S. Matoba, Y. Kodama, Y. Iwata, and K. Stamnes, 2020: Effects of snow grain shape and mixing state of snow impurity on retrieval of snow physical parameters from ground-based optical instrument. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, **125**, e2019JD031858.
 25. Joseph Ching and Mizuo Kajino, 2020: Rethinking Air Quality and Climate Change after COVID-19. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **2020**, **17(14)**, 5167.
 26. Toyota, T., T. Ono, T. Tanikawa, P. Wongpan, and D. Nomura, 2020: Solidification effects of snowfall on sea-ice freeze-up: results from an onsite experimental study. *Annals of Glaciology*, 1-10.
 27. Onuma, Y., Takeuchi, N., Tanaka, S., Nagatsuka, N., Niwano, M., and Aoki, T., 2020: Physically based model of the contribution of red snow algal cells to temporal changes in albedo in northwest Greenland. *The Cryosphere*, **14**, 2087-2101.
 28. Tan, J., J. S. Fu, G. R. Carmichael, S. Itahashi, Z. Tao, K. Huang, X. Dong, K. Yamaji, T. Nagashima, X. Wang, Y. Liu, H.-J. Lee, C.-Y. Lin, B. Ge, M. Kajino, J. Zhu, M. Zhang, L. Hong, and Z. Wang, 2020: Why do models perform differently on particulate matter over East Asia? A multi-model intercomparison study for MICS-Asia III. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20(12)**, 7393-7410.
 29. Cuizhi Sun, Kouji Adachi, Kentaro Misawa, Hing Cho Cheung, Charles C. -K. Chou, Nobuyuki Takegawa, 2020: Mixing State of Black Carbon Particles in Asian Outflow Observed at a Remote Site in Taiwan in the Spring of 2017. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, **125**.
 30. M. Hartmann, K. Adachi, O. Eppers, C. Haas, A. Herber, R. Holzinger, A. Hunerbein, E. Jakel, C. Jentsch, M. van Pinxteren, H. Wex, S. Willmes, and F. Stratmann, 2020: Wintertime airborne measurements of ice nucleating particles in the high Arctic. *Geophysical Research Letters*, **47**.
 31. Mizuno, Y., T. Yagi, and K. Mori, 2020: Momentum flux in turbulent boundary layers with weakly unstable stratification. *Fluid Dynamics Reserch*. (submitted)
 32. Takigawa, M., P. K. Patra, Y. Matsumi, S. K. Dhaka, T. Nakayama, K. Yamaji, M. Kajino, and S. Hayashida, 2020: Can Delhi's pollution be affected by crop fires in the Punjab region?. *SOLA*, **16**, 86-91.
 33. Sekiyama, T. and M. Kajino, 2020: Reproducibility of surface wind and tracer transport simulations over complex terrain using 5-, 3-, and 1-km grid models. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **59(5)**, 937-952.
 34. Mouri, H., T. Morinaga, T. Yagi, and K. Mori, 2020: Logarithmic and nonlogarithmic scaling laws of two-point statistics in wall turbulence. *Physical Review E*, **101**, 053103.
 35. Katata G., K. Matsuda, A. Sorimachi, M. Kajino, K. Takagi, 2020: Effects of aerosol dynamics and gas-particle conversion on dry deposition of inorganic reactive nitrogen in a temperate forest. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 4933-4949.
 36. 廣瀬聡, 青木輝夫, 庭野匡思, 的場澄人, 谷川朋範, 山口悟, 山崎哲秀, 2021: 北西グリーンランド氷床上 SIGMA-A サイトで観測された雪面熱収支の特徴. *雪氷*, **83(2)**, 143-154.
 37. 青木輝夫, 的場澄人, 庭野匡思, 朽木勝幸, 谷川朋範, 竹内望, 山口悟, 本山秀明, 藤田耕史, 山崎哲秀, 飯塚芳徳, 堀雅裕, 島田利元, 植竹淳, 永塚尚子, 大沼友貴彦, 橋本明弘, 石元裕史, 田中泰宙, 大島長, 梶野瑞王, 足立光司, 黒崎豊, 杉山慎, 津滝俊, 東久美子, 八久保晶弘, 川上薫, 木名瀬健, 2021: SIGMA 及び関連プロジェクトによるグリーンランド氷床上の大気・雪氷・雪氷微生物研究-ArCS II プロジェクトへのつながり -. *雪氷*, **83(2)**.

38. 庭野匡思, 青木輝夫, 橋本明弘, 大島 長, 梶野瑞王, 大沼友貴彦, 藤田耕史, 山口 悟, 島田利元, 竹内 望, 津瀧 俊, 本山秀明, 石井正好, 杉山 慎, 平沢尚彦, 阿部彩子, 2021: 氷床表面質量収支の実態とそのモデリングの試み: 2020年夏最新版. *雪氷*, **83**, 27-50.
39. 高橋麗, 梶野瑞王, 津口裕茂, 林修吾, 橋本明弘, 2021: 雲凝結核が降水に与える影響—平成27年9月関東・東北豪雨を対象として—. *エアロゾル研究*, **36**, 55-64.
40. 川端康弘, 梶野瑞王, 財前祐二, 足立光司, 田中泰宙, 清野直子, 2021: 東京都心における視程の変化. *天気 (論文・短報)*, **68**, 5-12.

(2) 査読論文以外の著作物 (翻訳、著書、解説) : 16件

1. Sato, Y., T. T. Sekiyama, S. Fang, M. Kajino, A. Quérel, D. Quélo, H. Kondo, H. Terada, M. Kadowaki, M. Takigawa, Y. Morino, J. Uchida, D. Goto, and H. Yamazawa, 2020: A Model intercomparison of atmospheric ¹³⁷Cs concentrations from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, Phase III: Simulation with an identical source term and meteorological field at 1 km resolution. *Atmospheric Environment: X*, **7**.
2. Shima, S., Y. Sato, A. Hashimoto, and R. Misumi, 2020: Predicting the morphology of ice particles in deep convection using the super-droplet method: development and evaluation of SCALE-SDM 0.2.5-2.2.0, -2.2.1, and -2.2.2. *Geoscientific Model Development*, **13**, 4107-4157.
3. Saito, K., K. Watanabe, S. Haginoya, K. Takeda, T. Sueyoshi, T. Hirota, M. Mizoguchi, K. Harada, H. Hosaka, M. Kimura, H. Yabuki, 2020: Database for ground temperature and freezing depth in Japan.. *Polar Data Journal*, **4**, 83-96.
4. Hashimoto, A., M. Niwano, H. Fujinami, A. Sakai, and K. Fujita, 2020: Numerical simulation of the seasonal precipitation amount over the Himalayan mountain region using the JMA-NHM. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, **50**, 5-07.
5. Hashimoto, A., and S. Hayashi, 2020: Numerical simulations of the cloud and precipitation processes during the heavy rainfall events of early July 2017 and 2018 in Japan. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, **50**, 5-05.
6. Kawai, H., and T. Koshiro, 2020: Does Radiative Cooling of Stratocumulus Strengthen Summertime Subtropical Highs?. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Earth System Modelling/WMO*, **50**, 711-712.
7. Kawai, H., T. Koshiro, and S. Yukimoto, 2020: Relationship between shortwave radiation bias over the Southern Ocean and the ITCZ in MRI-ESM2. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Earth System Modelling/WMO*, **50**, 709-710.
8. Wada, A., 2020: Rainfall simulations of Typhoons Kammuri and Phanfone landfalling in the Philippines. *Research Activities in Earth System Modelling*, **50**, 9-11.
9. YONEHARA Hitoshi, MATSUKAWA Chihiro, NABETANI Takashi, KANEHAMA Takafumi, TOKUHIRO Takayuki, YAMADA Kazutaka, NAGASAWA Ryoji, ADACHI Yukimasa, and SEKIGUCHI Ryouhei, 2020: Upgrade of JMA's Operational Global Model. *CAS/JSC WGNE WGNE Research Activities in Earth System Modelling*, **50**, 6-11-12.
10. Wada, A., H. Yoshimura, and M. Nakagawa, 2020: The effect of the cloud-water conversion rate in the cumulus parameterization on the simulation of Typhoon Lionrock (2016). *Research Activities in Earth System Modelling*, **50**, 9-09.
11. 庭野匡思, 2021: 新刊紹介「サイエンス・パレット 037 南極と北極—地球温暖化の視点から」. *雪氷*, **83**, 211-212.
12. 橋本明弘, 中井専人, 山口 悟, 本吉弘岐, 2021: 降雪・積雪系オンラインワークショップ2020報告. *天気*, **68**.

13. 橋本明弘, 林修吾, 佐藤陽祐, 2020: 第3回雲・降水研究会報告. 天気, **67**, 713-714.
14. 守永武史, 毛利英明, 八木俊政, 森一安, 萩野谷成徳, 2020: 境界層乱流における不安定成層時の平均風速と風速変動. 風工学研究論文集, **26**, 25.
15. 中井専人, 橋本明弘, 山口 悟, 本吉弘岐, 2020: 降雪・積雪系オンラインワークショップ2020開催報告. 雪氷, **82**, 280-281.
16. 木村宏海, 八久保晶弘, 谷川 朋範, 2020: 塩濃度測定と融点降下から求める積雪含水率測定法. 北海道の雪氷, **39**, 9-12.

(3) 学会等発表 : 57 件

1. Wehrlé, A., Box, J., Niwano, M., Anesio, A. M. B., and Fausto, R. S., Greenland surface processes from PROMICE automatic weather station measurements and Sentinel-3 satellite observations, AGU Fall Meeting 2020, 2020年12月, 米国, virtual
2. Kawai, H., S. Yukimoto, T. Koshiro, N. Oshima, T. Tanaka, H. Yoshimura, and R. Nagasawa, Significant Improvement of Cloud Representation in MRI-ESM2, AGU Fall Meeting 2020, 2020年12月, 米国, virtual
3. Kuo, W-C., M. Murakami, T. Tajiri, N. Orikasa, and K. Yamashita, Droplet Size Distribution Activated and Grown from Hygroscopic Particles in CCNC, 日本気象学会2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
4. Niwano, M., Application of the polar regional climate model NHM-SMAP in the Antarctic ice sheet, Polar CORDEX Workshop, 2020年10月, オンライン, オンライン
5. 庭野匡思, 橋本明弘, Meteorological and snow/ice data around the Greenland ice sheet (1980-2019) calculated by the high-resolution polar regional climate model NHM-SMAP, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
6. Hashimoto, A., M. Niwano, H. Fujinami, A. Sakai, and K. Fujita, Numerical simulations of precipitation in high altitude Himalaya mountainous area by using JMA-NHM, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, 千葉市幕張
7. 庭野匡思, 橋本明弘, 津滝俊, 本山秀明, 平沢尚彦, 阿部彩子, Estimation of the Antarctic ice sheet surface mass balance using the polar regional climate model NHM-SMAP, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
8. 青木輝夫, 島田利元, 堀雅裕, 庭野匡思, 谷川朋範, 的場澄人, 飯塚芳徳, 藤田耕史, Interannual trend of satellite-derived snow grain size over the Greenland Ice Sheet, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
9. 對馬あかね, 庭野匡思, 青木輝夫, 大河原望, 谷川朋範, 的場澄人, 足立光司, 木名瀬健, 藤田耕史, Annual and seasonal variation trend of light-absorbing snow impurities components at Sapporo, Japan, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
10. Hashimoto, A., H. Motoyoshi, N. Orikasa, R. Misumi, and M. Niwano, Development and applications of the process-tracking scheme based on bulk microphysics to determine the properties of snow particles, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, 千葉市幕張
11. 折笠成宏, 村上正隆, 田尻拓也, 財前祐二, 篠田太郎, In situ measurements of aerosol and cloud microphysical properties and cloud seeding experiments over the UAE: Part 2, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
12. Kawai, H., and T. Koshiro, Stability Index for Marine Low Cloud Cover over the Mid-latitudes, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
13. Kuo, W-C., M. Murakami, T. Tajiri, N. Orikasa, and K. Yamashita, Droplet Size Distribution Activated and Grown from Hygroscopic Particles in CCNC, 日本気象学会2020年度春季

大会, 2020年5月, 神奈川県川崎市

14. 庭野匡思, 積雪モデル SMAP の日本全国運用, 科研費基盤 B「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」(代表: 川瀬宏明) オンライン全体会合, 2021年3月, オンライン
15. 庭野匡思, Antarctic ice sheet surface mass balance 1980-2020 from the polar regional climate model NHM-SMAP, 新学術『南極の海と氷床』2020年度年次報告会, 2021年3月, virtual
16. 庭野匡思, 公募研究第2期: 「過去40年間の南極氷床表面質量収支高精度計算」進捗状況, 第2回南極新学術 SMB ミーティング, 2021年3月, オンライン
17. Kuo, W-C., M. Murakami, T. Tajiri, N. Orikasa, and K. Yamashita, 雲核計内における吸湿性フレイア粒子の雲核活性と雲粒粒径分布に関する数値計算, 2020年度エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会, 2021年2月, オンライン
18. 川合秀明, 総説: 海上の下層雲の概要、気候モデルにおけるそのパラメタリゼーション, エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会, 2021年2月, オンライン
19. 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(つくばの事例), 2020年度エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会, 2021年2月, オンライン
20. 折笠成宏, 斎藤篤思, 山下克也, 田尻拓也, 財前祐二, Tzu-Hsien Kuo, Wei-Chen Kuo, 村上正隆, つくば地上モニタリング観測による実大気エアロゾルの雲核能・氷晶核能の変動(その2), エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会, 2021年2月, オンライン
21. 庭野匡思, グリーンランド氷床表面融解と表面質量収支に対する雲放射の影響, ArCS II 気候予測課題連携グループ: 雲放射-雪氷相互作用 オンライン会議, 2021年2月, オンライン
22. 川合秀明, 何が地球の将来の温度を決めるのか?, 地球環境講演会, 2021年1月, オンライン
23. 庭野匡思, 最新の積雪モデルで拓く次世代雪関連防災情報確立への道, 令和2年度関東甲信地区調査研究会, 2021年1月, オンライン
24. 庭野匡思, 北極域の急速な温暖化, 2020年気象庁気象研究所成果発表会, 2020年12月, オンライン
25. 川合秀明, 地球温暖化によって将来の気候はどう変わるのか?, 船橋市・オンライン市民公開講座, 2020年12月, オンライン
26. 村上正隆, 篠田太郎, 高橋暢宏, 坪木和久, 増永浩彦, 堀江宏昭, 山田広幸, 折笠成宏, 田尻拓也, 財前祐二, 川合秀明, 松木篤, 牧輝弥, 竹村俊彦, Walter Strapp, Lyle Lilie, Thomas Ratvasky, Kris Bedka, 高濃度氷晶雲の実態把握と検出法・予測法開発に関する基礎的研究 - 航空機観測実施時期の検討 -, 「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, 2020年12月, オンライン
27. 折笠成宏, 村上正隆, 田尻拓也, 財前祐二, 篠田太郎, UAE 上空におけるエアロゾル・雲の直接観測, 「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, 2020年12月, オンライン
28. 守永武史, 毛利英明, 八木俊政, 森一安, 萩野谷成徳, 境界層乱流における不安定成層時の平均風速と風速変動, 第26回風工学シンポジウム, 2020年11月, オンライン
29. 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・カナック氷帽上 SIGMA-B における熱収支解析に基づく表面融解メカニズムの考察, 雪氷研究大会(2020・オンライン), 2020年11月, オンライン
30. 谷川朋範, 青木輝夫, 石元裕史, 増田一彦, 庭野匡思, 堀雅裕, 八久保晶弘, 的場澄人, 杉浦幸之助, 島田利元, 大河原望, 積雪と海水の波長別偏光特性, 雪氷研究大会(2020・オンライン), 2020年11月, オンライン
31. 中山雅茂, 直木和弘, 谷川朋範, 長幸平, 野外プールを使った海水成長過程観測システムの開発, 雪氷研究大会(2020・オンライン), 2020年11月, オンライン
32. 直木和弘, 中山雅茂, 谷川朋範, 長幸平, 海水の厚さと3周波数帯のマイクロ波輝度温度の関

- 係, 雪氷研究大会 (2020・オンライン), 2020年11月, オンライン
33. 木村宏海, 八久保晶弘, 舘山一孝, 谷川朋範, サロマ湖海氷上の積雪含水率の測定, 雪氷研究大会 (2020・オンライン), 2020年11月, オンライン
 34. 豊田威信, 小野貴司, 谷川朋範, Pat Wongpan, 野村大樹, 降雪が結氷初期の海氷凍結過程に及ぼす影響について, 日本海洋学会 2020年度秋季大会, 2020年11月, オンライン
 35. 庭野匡思, 極域・雪氷研究への誘い, 気象大学校オンラインコロキウム, 2020年11月, オンライン
 36. 折笠成宏, 村上正隆, 田尻拓也, 財前祐二, 篠田太郎, UAE上空におけるエアロゾル・雲の直接観測 (その3), 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 37. 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, 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 38. 村上正隆, 篠田太郎, 高橋暢宏, 坪木和久, 増永浩彦, 堀江宏昭, 山田広幸, 折笠成宏, 田尻拓也, 財前祐二, 川合秀明, 松木篤, 牧輝弥, 竹村俊彦, Walter Strapp, Lyle Lilie, Thomas Ratvasky, Kris Bedka, 高濃度氷晶雲の実態把握と検出法・予測法開発に関する基礎的研究 - 航空機観測実施時期の検討 -, 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 39. 橋本明弘, 石坂雅昭, 山下克也, 本吉弘岐, 中井専人, 山口悟, 2018年冬季 JPCZに関連した降雪形成機構に関する数値実験, 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 40. 中川雅之, 川合秀明, 気象庁全球モデルへの浅い積雲対流スキームの導入 (2), 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 41. 川合秀明, 神代剛, 亜熱帯下層雲の放射冷却は夏季の亜熱帯高気圧を強化するか?, 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 42. 千葉丈太郎, 川合秀明, 層積雲スキーム改良による SST-SW フィードバックの改善, 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 43. 橋本明弘, 森健彦, 新堀敏基, 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2, 日本火山学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, 日本
 44. 豊田威信, 小野貴司, 谷川朋範, Pat Wongpan, 野村大樹, 雪が結氷初期の海氷成長に及ぼす影響について, 雪氷研究大会 (2019・山形), 2020年9月, 山形市
 45. 橋本明弘, 雲・降水の数値シミュレーション, 日本気象学会 2020年度夏季大会, 2020年8月, オンライン
 46. 庭野匡思, 南極新学術公募研究成果報告, 科研費新学術領域研究「南極の海と氷床」2020年度全体会議, 2020年8月, オンライン
 47. 橋本明弘, 石坂雅昭, 山下克也, 本吉弘岐, 中井専人, 山口悟, 2018年冬季大雪事例の降雪粒子特性に関する数値実験, 降雪・積雪系オンラインワークショップ 2020, 2020年7月, オンライン
 48. 庭野匡思, 南極に適用した極域気候モデル NHM-SMAP の設定と初期評価結果, 南極新学術SMB オンラインミーティング, 2020年6月, オンライン
 49. 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, 日本気象学会 2020年度春季大会, 2020年5月, オンライン
 50. 守永武史, 毛利英明, 萩野谷成徳, 八木俊政, 森一安, 境界層乱流における不安定成層時の風速・温度変動, 日本気象学会 2020年度春季大会, 2020年5月, オンライン
 51. 谷川朋範, 庭野匡思, 大河原望, 石元裕史, 青木輝夫, ニーオルスンにおける全天分光日射計を用いた積雪粒径・積雪不純物濃度の推定, 日本気象学会 2020年度春季大会, 2020年5月, オンライン
 52. 川端康弘, 田中泰宙, 財前祐二, 梶野瑞王, 足立光司, 東京と熊谷における視程の経年変化, 日本気象学会 2020年度春季大会, 2020年5月, オンライン
 53. 中川雅之, 川合秀明, 気象庁全球モデルへの浅い積雲対流スキームの導入, 日本気象学会 2020

年度春季大会, 2020年5月, オンライン

54. 橋本明弘, 石坂雅昭, 山下克也, 本吉弘岐, 中井専人, 山口悟, 2018年冬季大雪事例の降雪粒子特性に関する数値実験, 日本気象学会2020年度春季大会, 2020年5月, 川崎市
55. 千葉丈太郎, 川合秀明, 層積雲スキーム改良によるSST-SWフィードバックの改善, 日本気象学会2020年度春季大会, 2020年5月, 神奈川県川崎市
56. 折笠成宏, 村上正隆, 田尻拓也, 財前祐二, 篠田太郎, UAE上空におけるエアロゾル・雲の直接観測(その2), 日本気象学会2020年度春季大会, 2020年5月, オンライン
57. 林 修吾, 梅原章仁, 南雲信宏, 二重偏波レーダによる粒子判別を用いた雷雲内の粒子分布と雷活動の関係, 雲・降水研究会(第三回), 2020年5月, Web開催

受賞・報道・アウトリーチ活動等

・講演・アウトリーチ

1. 毛利 英明 「大気乱流入門」神戸大学理学研究科 集中講義 惑星学詳論II(令和2年6月23日)
2. 橋本明弘「雲・降水の数値シミュレーション」日本気象学会第54回夏季大学(令和2年8月22日)
3. 谷川 朋範 講演会「変わりつつある日本の雪と雪崩災害」JST主催サイエンスアゴラ2020(令和2年11月22日)
4. 川合 秀明 「地球温暖化によって将来の気候はどう変わるのか?」アースドクターふなばし主催オンライン市民公開講座(令和2年12月11日)
5. 庭野 匡思 「北極域の急速な温暖化」令和2年度 気象研究所 研究成果発表会(令和2年12月16日-3年1月27日)
6. 川合 秀明 「何が地球の将来の温度を決めるのか?」アースドクターふなばし主催オンライン地球環境講演会(令和3年1月27日)

・受賞等

1. 大気環境学会 令和2年度 最優秀論文賞
市川陽一, 露木敬允, 薦田直人, 宮元健太, 廣畑智也, 中園真衣, 関光一, 毛利英明, 守永武史「森林における大気汚染物質の輸送におよぼす遮蔽による流体力学的効果の解析」大気環境学会誌, 55, 50-59
2. 日本雪氷学会 2020年度 関東・中部・西日本支部賞(活動賞)
斎藤和之および日本国内地温・凍結深データベース 作成委員会(萩野谷成徳ほか)「日本国内の地温・凍結深観測値のデータレスキューによる雪氷研究推進と教育・普及に対する貢献」

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

研究年次：2年目／5年計画（令和元年度～令和5年度）

研究代表者：清野直子（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

〔台風・災害気象研究部〕○和田章義、嶋田宇大、柳瀬 亘、林 昌宏、小野耕介
〔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

〔台風・災害気象研究部〕○益子 渉、廣川康隆、荒木健太郎、鈴木 修
〔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

〔台風・災害気象研究部〕○楠 研一、足立 透、猪上華子、鈴木 修

（副課題4）先端的気象レーダーの観測技術の研究

〔台風・災害気象研究部〕○足立アホロ、梅原章仁、永井智広、足立 透、荒木健太郎
〔気象予報研究部〕林 修吾
〔気象観測研究部〕石元裕史、瀬古 弘、吉田 智
〔火山研究部〕佐藤英一

研究の動機・背景

（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、気象庁で令和元年度から現業利用を開始した二重偏波レーダー、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を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、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)

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)

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)

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。

研究の成果の到達目標

(副課題1)

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)

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)

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認する。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)

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。

令和2年度の研究計画

(副課題1)

ひまわり8号高頻度大気追跡風や気象レーダーデータ、数値予報モデル等を用いた構造変化プロセス及び台風内部の変動過程に関する解析研究、並びに台風活動及び温帯低気圧化の気候学的特徴の抽出に関する研究を引き続き実施する。数値予報システム等を用いた台風予測可能性研究を引き続き実施する。台風予測精度向上に向け、機械学習を用いた台風予測システムシステムの改良を実施する。解析サーバー等において使用する解析ツールを引き続き整備・拡張する。当該年度の台風について、特に社会に深刻な影響をもたらした事例について、各種観測・数値シミュレーションデータの解析を即時に実施し、台風の特徴を調査する。

(副課題2)

近年発生した大雨(線状降水帯による事例を含む)や突風、降雪事例について、特に顕著なものを中心に、各種観測データや客観解析データ及び数値シミュレーション結果を解析し、環境場の特徴や、現象の構造、発生機構の解明を行う(※)。

令和元年度に開発した線状降水帯の客観的な検出手法を改良した上で、過去10年程度の国内における線状降水帯の発生の特徴や環境場に関する調査を進める。これらの調査で得られた結果をもとに、線状降水帯発生の診断的予測指標である線状降水帯6条件の改善の可能性を検討する。

突風の実態把握と突風予測のための検証用データとしての利用を目的に、全国のアメダス1分値データを用いて突風事例の抽出を行い、突風の統計的な調査を行う。

首都圏で発生した降雪事例について、気象研究所「#関東雪結晶プロジェクト」を通して得られたシチズンサイエンスデータを活用し、地上降雪粒子分布を踏まえた降雪雲の物理特性と大気環境場の調査を進める。また、この結果を踏まえ、アンサンブルシミュレーションを通じた首都圏の降雪現象の予測可能性について検討する。

特に顕著な現象が発生した時は、速やかに各種観測データの解析・非静力学数値予報モデルの実行結果からその発生要因等を調査する。

※「2019年台風第19号による豪雨」、「2019年10月24～26日低気圧等による大雨」、「顕著な暴風・突風をもたらした2019年台風第15号」、「2015年台風第15号の通過に伴って八重山諸島で発生した記録的な暴風・突風」、「2018年1月22日に南岸低気圧の通過に伴って発生した首都圏の大雪」等。

(副課題3)

引き続き国内外の各種気象レーダーによるデータベースを構築するとともに、竜巻シミュレーターの開発を通して必要な教師データを拡充する。またデータベースのAIによる解析を通じ、現象の発生季節・頻度・エリア等の災害リスク解析に着手する。さらに令和1年度の研究開発で進展した深層学習モデルをさらに発展させた様々な竜巻やレーダーに対応可能な汎用型検出技術の開発、および深層学習を利用した竜巻等突風探知の実用化を目指す。

(副課題4)

(a) 偏波情報を用いた降水強度高精度推定に関する研究

レーダーシミュレーターによる雨滴の散乱特性の計算を行い、粒径分布に対する二重偏波レーダーで観測される偏波パラメータのデータベースを作成する。またデータベースに基づき雨滴粒径分布のパラメータを二重偏波レーダーの観測データから推定する手法の改良と高度化を行う。

(b) 偏波情報を用いた粒子判別に関する研究

二重偏波パラメータなどを用いて、クラッター等のノイズを除去するとともに、降水粒子の種別を判別アルゴリズムの開発に着手する。また降水粒子と積乱雲内の電荷分布の関係の調査を行う。

(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

レーダー位相データの品質管理手法の開発及び水蒸気推定手法の改良を行う。また、C-band など気象用二重偏波レーダーに用いられている波長に対する雪粒子モデルの散乱特性を計算するためのシミュレーターの開発及び散乱計算を行う。

(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に固有の問題に対処するための技術開発を行う。

令和2年度の研究成果

成果の概要

(1) 課題全体

各課題ともおおむね順調に進捗した。詳細は副課題ごとに記述する。

(2) 副課題

(副課題1)

①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

【構造変化プロセス及び台風内部の変動過程に関する解析研究】

- ハリケーン発達・定常事例に関する観測研究において、なぜ発達事例は定常事例よりも強い上昇流をアップシア（鉛直シアバクトルの後方側）左象限(USL)に持つのかについて、航空機搭載レーダーデータを用いて調査した。鉛直シア環境場におけるハリケーン発達事例のうち半数以上で、高度12kmのUSLに波数1構造の上昇流最大域が存在していた。発達事例では、対流圏下層に定常事例より強いインフローがあり、ダウンシア右象限での対流開始が最大風速半径(RMW)より十分に内側の領域で起きていた。またダウンシア側のRMW内側では2-8m/sの上昇流頻度が定常事例よりも多く、これらが対流活動の最終段階としてUSLでの上層対流につながっていたと考えられる。USLのRMW内側で上層対流が活発な場合、RMW内側の自由大気下層ではストレッチング項の寄与により正の渦度傾向が軸対称に分布していた。USLでの活発な対流活動は自由大気下層での軸対称な渦の発達に重要な役割を果たす。
- 甚大な大雨災害をもたらした令和元年東日本台風(第19号)について、台風の北側に降水が集中した非対称化メカニズムを、格子間隔2kmの気象庁非静力学モデルを用いて解析した。台風が傾圧場に近づいた時には、温暖前線形成や準地衡的な強制上昇による降水が支配的であり、温帯低気圧化の先行研究と整合的な特徴が見られた。一方で、台風が傾圧場から近づく前には、前線形成が弱いにもかかわらず非対称化が生じており、対称不安定に似た外向きに傾いた上昇流が台風の北側で強化していたことをトラジェクトリと渦位の解析で明らかにした。

【台風活動及び温帯低気圧化の気候学的特徴の抽出に関する研究】

- 台風の温帯低気圧化後の再発達に関して、1979年～2018年の気象庁ベストトラックとJRA-55再解析データを用いて統計的な解析を行った。再発達した事例は、(典型的な台風とは異なり)比較的に高緯度の海面水温が低い環境場に多く、また、(典型的な温帯低気圧とも異なり)下層傾圧場との対応も不明瞭であった。時間スケールの分離により非断熱加熱による上層東側のリッジ形成が重要であることを明らかにした。
- 2016年8月の特異な日本上陸及び高頻度の温帯低気圧化をもたらした台風経路の特徴を明らかにするため、k平均法及び低気圧位相空間解析を2001年から2016年の8月の台風について行い、また台風周辺の大気環境場の特徴を明らかにするためコンポジット解析及び事例解析も実施した。k平均法から、2016年8月の台風経路は2001年から2015年までの8月における経路や2016年9月の経路より北向きの特徴をもつ。CPS解析結果から、2016年8月のETは2001年から2015年8月のものと比べて、暖気核から寒気核構造へ短い期間で小さい構造変化をとるという特徴をもつ。

2016年8月の総観場は、対流圏上層のジェット気流の蛇行の強化、対流圏中層の強いトラフ、対流圏下層の台風付近での暖かい空気により特徴づけられる。2016年8月の北向きの経路をもつことによる特異な台風の日本上陸、高頻度なET及びETにおける小さい構造変化は、これらの総観場の特徴により説明することができる。

- 1982年1月から2020年6月にかけて、26°Cを超える上層海洋貯熱量（TCHP）の増加傾向及び内部変動及びこれらが2019年台風第15号及び第19号の台風強度に及ぼす影響を調査した。台風下におけるTCHPは、HAGIBISによる海水温低下の影響が見られたものの、HAGIBIS成熟期の一部期間を除き、気候学的平均値よりも高かった。TCHPは2つの台風が強化または維持された2つの海域、亜熱帯海域（15–20°N、140–150°E）および中緯度海域（30–35°N、130–140°E）地域において、経年変動変動を伴いつつ大幅に増加した。TCHPの経験的直交関数（EOF）解析結果から、主要な3つのEOFモードでTCHP変動全体の約76.8%を説明する。台風第19号発達初期におけるTCHPの増加は海洋内部変動では説明できず、地球温暖化の寄与が考えられる。
- 沖縄南方海域を北西進し台湾に上陸した2015年台風Dujuanについて非静力学大気波浪海洋結合モデルによる数値シミュレーションを実施し、海面フラックスデータセット（J-OFURO3）の日別値と比較した。大気再解析データ（JRA-55）と比較して、J-OFURO3の海上風速場は数値シミュレーションで再現される台風域内の風速場を良好に表現した。またJ-OFURO3海面水温プロダクトは台風通過時の海面水温低下を良好に表現していた。一方でJ-OFURO3は気温、比湿、潜熱に関して、台風域内で欠損が見られ、これは台風域内の降水域に対応していた。

②台風予測技術の高度化と予測可能性研究

【AIを用いた台風予測システムシステムの改良・台風予測可能性研究】

- ランダムフォレストに基づいた台風強度予測技術の精度検証を実施し、その結果に基づき、急発達・急衰弱事例の多い2019年の予測に対する改善方法を検討した。
- 米国静止気象衛星搭載の雷センサ（GLM）で観測されたデータを用いて、熱帯低気圧における雷の活動と強度変化の関係性について調査した。強度75kt以上の熱帯低気圧では雷の数と強度に正の相関があること、強度75kt以上の発達事例は内部領域で雷の数が多いこと、24時間後の強度変化量と雷の数は現在強度が90–110ktの事例で正の相関があること、雷の発生数は熱帯低気圧の急発達予測モデルに寄与する可能性があることがわかった。
- 発達事例がUSLの対流圏上層に活発な対流を持つ傾向は、赤外衛星データからも見い出せることがわかった。また、強度が70kt以下の事例では、鉛直シアベクトルの後方右側の平均輝度温度に発達事例と定常事例で有意な差があることがわかった。さらに中心から半径30km以内で最大の輝度温度値が最大風速の変化量と負の相関を持つこともわかった。これら3つの特徴を、新しく開発した急発達予測モデルの説明変数として使用した結果、従来のモデルに比べ、急発達の予測精度をブライアスキルスコア（BSS）で約3スコア改善し、特に75kt以上の強度事例においてはBSSで約6スコア改善した。
- 強雨の確率的予測の精度向上を目的に、全球アンサンブル摂動をメソ特異ベクトル（MSV）法に利用することで、特定擾乱を対象としたMSVの算出を試みた。2018年の台風事例及び2020年7月を対象に実験を行い、南洋上に偏在したMSVの分布が台風・梅雨前線周辺の強雨域近傍に優先的に算出できること、アンサンブル予報において降水確率予測精度が向上することを確認した。
- 台風等顕著現象の1日先以上の確率的予測精度の改善を狙い、MSVの解像度及び評価時間依存性を調査した。その結果、本庁現業で利用されているMSVの設定において、評価時間を30時間程度まで延長できることを確認し、これにより予測後半に適したアンサンブル初期摂動に利用できる可能性が示唆された。
- 台風等顕著現象に対する複数の気象予測シナリオを作成するために、メソアンサンブル予報（MEPS）の予測値に対してファジークラスター解析を行った。得られたクラスター平均を複数のシナリオとして評価し、摂動を与えないコントロールランより一定の予測期間で精度の良いシナリオが得られることを確認した。合わせてクラスター平均降水予報に対して確率マッチング（Probability Matching）手法を適用し、平均処理によって平滑化された予想降水量のキャリブレーションを行い、強雨予測へのインパクトを確認した。

③新しい台風解析・予測技術の導入による台風研究の推進

【解析サーバー整備、令和2年台風】

- ・ クロストラック走査マイクロ波放射計(ATMS)などのマイクロ波サウンダ、ひまわり8号/可視赤外放射計(AHI)などの赤外イメージャ、フーリエ変換スペクトロメータ(CrIS)などの赤外ハイパースペクトラルサウンダ(HSS)から得られた晴天輝度温度データに基づき、気温・比湿プロファイルを解析するソフトウェアのプロトタイプを開発した。開発したソフトウェアは解析サーバーに導入し、台風の事例解析に用いる予定である。
- ・ 気象庁で大学・研究機関と情報共有するために運用している顕著台風事例解析ウェブを本課題で整備した解析サーバーから参照できるように環境を整備し、2020年台風第10号の発表資料を掲載した。ひまわり8号台風機動観測モニター(2.5分及び30秒観測)、海洋貯熱量、海面水温モニターを整備した。2020年台風第12号・第14号の概要をまとめた資料も作成し、気象庁内関係者に共有した。
- ・ 2020年に日本に接近した台風第10号について、非静力学大気波浪海洋結合モデルを用いて数値シミュレーションを実施した。台風発達期における台風第10号による海面水温低下が台風第10号の発達を抑制する効果は、初期値における海面水温プロダクトの差による効果よりも大きかった。気象レーダー観測から見られた多重眼構造に関して、水平解像度2kmのモデルによる数値シミュレーション結果では、最内部の壁雲からの外出流に起因する下降流による乾燥域形成がある程度再現された。

(副課題2)

①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

【顕著現象に関する事例解析】

- ・ 令和2年7月豪雨の7月上旬に九州で生じた線状降水帯の特徴について調査した。球磨川流域で生じた線状降水帯は、長さが約280kmで13時間停滞するなど、2009年以降に九州で発生した線状降水帯のうち、規模が最も大きく、持続時間も最長であったこと、この線状降水帯による最大3時間降水量は280mm、総降水量は約650mmで、降水の強さも過去最大級であったことがわかった。
- ・ 令和2年7月豪雨における九州の線状降水帯の発生環境場を調査し、近年の豪雨事例と比較した。豪雨期間中に9個の線状降水帯が客観的に抽出され、線状降水帯によって1時間100mm以上の短時間の大雨が合計20回発生していた。2020年7月3~4日の熊本県・鹿児島県(2020KK)の環境場は、平成30年7月豪雨以上の中層の湿潤な暖気が見られたが、平成29年7月九州北部豪雨と同様に上層寒気の影響を受けていたため、深い対流の発達に好都合な環境だった。このため、線状降水帯の雷活動が活発で、近年の豪雨と比較して最も雲頂が高かった。また、2020KKと7月6~7日の九州北部の線状降水帯は梅雨前線上に発生したメソ低気圧南側の下層収束域上に位置しており、極めて大きな下層水蒸気フラックスを伴うインフローの影響を受けていた。令和2年7月豪雨のほぼ全ての線状降水帯の環境場にメソ低気圧が存在しており、水平風を強めることで極めて大きな下層水蒸気フラックスをもたらし、短時間の大雨を発生させたと考えられる。これらの成果について2020年12月24日に報道発表を行った。
- ・ 令和元年東日本台風(台風第19号)に伴う大雨における降水強化メカニズムについて調査した。水平解像度2kmの気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)による数値シミュレーションを行い、地形を除去する感度実験も実施した。その結果、地形の影響を受けて総降水量が極めて大きくなっていった地域があったが、台風の温帯低気圧化に伴う前線の影響で台風進路の西側で降水が強化されていた。これらの降水強化メカニズムとしては、地形性上昇流により形成された下層雲に雨が降ることで雲粒の捕捉による雨の成長が見られたほか、前線面の上昇流に対応する下層~中層の雲にも雨が降り、雲粒の捕捉で雨が成長していた。このような地形と前線での下層雲に対する Seeder-Feederメカニズムで降水が強化されたと考えられる。
- ・ 令和2年7月8日の梅雨前線に伴い発生した複数の突風災害では、竜巻が梅雨前線上のメソ低気圧のやや南のストームに相対的なヘリシティ(SRH)の大きな領域で、また、ガストフロントやダウンバーストが梅雨前線付近で下層に低相当温位(乾いている)領域で発生していたことがわかった。
- ・ 令和元年房総半島台風(2019年台風第15号)に伴い、内房を中心に観測された突風率が高く極端に大きな最大瞬間風速は、発達した台風のコア構造によるものだけでなく、下層のストリーク

構造や地形の影響を受けていたことが、ドップラーレーダーによる観測や高解像度数値シミュレーションの結果から明らかになった。

- 2014年2月14～15日に関東甲信地方で発生した大雪について、JMA-NHM及び局所アンサンブル変換カルマンフィルタを用いた数値実験システム(NHM-LETKF)により水平解像度5kmのアンサンブルシミュレーションを行った。その結果、関東甲信地方で大雪となったメンバーでは降雪前の下層気温がそもそも低い傾向があり、南岸低気圧の発達度合い・中心位置に伴う下層風向の違いによって特に内陸で地形の影響により降雪量の多くなる地域に違いが見られた。

②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

【顕著現象の発生状況のデータベース化と統計解析】

- 令和元年度に開発した線状降水帯の客観的な検出手法を改良し、従来は見逃していた強雨域事例の多くをよりの確に「線状降水帯」として検出できるようになった。この改良によって検出された過去の線状降水帯事例と比較することで、令和2年7月豪雨の降水の特徴をより明瞭に示すことができた。
- 1989年～2020年の解析雨量の特徴についてトレンド検定および均質性検定を用いて調査した。2006年3月以降の水平解像度1kmの解析雨量を5kmに変換する場合、従来の手法では強い降水の出現頻度の長期変動を適切に反映できない場合があるため、5km格子に属する1km格子30個のうち上位3番目を代表値とする手法がより適切であることがわかった。また2006年3月以降の解析雨量の時間積算は、本来の1km解像度で積算した降水量を5km変換することで過大な値となることを抑制できることを確認した。これらの調査結果により、解析雨量が作成されている過去30年強の線状降水帯の統計解析を適切に行えると期待できる。
- 突風の実態把握と突風予測のための検証用データとしての利用を目的に、全国のアメダス約900地点の1分値データを用いて突風の抽出を行ったところ、2020年においては約900事例が検出された。
- 2018年1月22日の関東地方の大雪事例について、「#関東雪結晶 プロジェクト」で得られたシチズンサイエンスデータ等を用いて降雪結晶特性を調査した。その結果、まず関東南部中心に沿岸前線上で発生した対流性の降雪雲から濃密雲粒付結晶の降雪が見られ、その後に南岸低気圧に伴う降雪に変化した。低気圧に伴う降雪では、一貫して交差角板状や砲弾状の低温型結晶に加え、角柱状や樹枝状の降雪結晶が混ざって降っていた。22日夜にはこれに加えて針状結晶も見られ、高層気象観測の結果から高度2～5kmの暖気流入に対応するものであると考えられる。

(副課題3)

①竜巻の実事例とシミュレーションによる教師データ整備

- 2010年以降に発生した突風被害に関連するレーダー観測データの収集と、シミュレーションによる模擬的なレーダーデータを作成するとともに、竜巻の時間的推移を利用するモデル、さらに地形等に起因する異常パターン検出のための教師データを整備した。
- 夏季太平洋岸で比較的高頻度で竜巻が発生する災害リスクエリアにおいて、2019年度に鉄道事故を発生させた竜巻のシミュレーション結果を用いた自動探知を行い、疑似的な鉄道へのアラート情報実験に成功した。

②AIを用いた竜巻の自動検出・追跡技術の開発

- 夏季竜巻の探知について複数の深層学習モデルによる、適中率の精度向上を確認した。
- 日本の竜巻モデルを用い、竜巻の様相もレーダーの仕様も異なる米国レーダーデータによる探知実験を行い良好な結果を得た。
- 局地的大雨の探知・追跡・予測アルゴリズムの開発を完了した。
- フェーズドアレイレーダーによる竜巻の3次元自動探知技術の開発を進め、令和元年10月12日に発生した市原竜巻に関して探知実験を実施し、良好な結果を得た。

③自動予測・情報提供システムの開発

- 局地的大雨の探知・追跡・予測に対し、自動アラートを出すための情報生成と携帯情報端末等への配信を行うシステムを開発し、初期実験を完了した。

- ・ 鉄道用ドップラーレーダーへの世界初の実装を 11 月に行った。さらに事業者範囲拡大を図るため、精度の数値目標等についてのニーズ検討を行った。

(副課題 4)

①偏波情報を用いた降水強度高精度推定に関する研究

- ・ 温度や波長別の雨滴の散乱特性の計算を行い、雨滴の粒径分布を二重偏波レーダーで観測した偏波パラメータから直接推定する手法のプロトタイプを開発した。
- ・ 本手法を用いたシミュレーションの結果、気象庁が利用している C-band のレーダーでは偏波パラメータが粒径分布だけでなく雨滴の温度によっても変化することが判明した。そこで本手法で推定した降水強度の雨滴温度に対する感度について調査した。

②偏波情報を用いた粒子判別に関する研究

- ・ 降水粒子判別アルゴリズムのプロトタイプを作成。判別結果を用いて、鉛直方向の粒子種別の存在率を示す指数を試作し、ダウンバースト発生前兆を調査した。その結果、“雹”だけでなく、“0°C 高度以上の雨滴”の鉛直存在率を考慮することで、ダウンバースト発生前後の特徴を捉えられる可能性を見出した。
- ・ 粒子判別アルゴリズムのプロトタイプに、竜巻飛散物の判別機能を追加した。また、市原竜巻に当該機能を適用したところ、本格的な被害に先立って、弱い渦が地表に到達し、その結果最初の TDS が飛散されたと示唆される結果を得た。
- ・ 三次元雷標定観測データによる電荷分布の三次元位置情報と、二重偏波情報及び降水粒子判別結果と比較する調査を実施した。
- ・ 粒子判別による雷雲内の粒子情報と雷放電頻度の関係を明らかにし、新しい雷指標を提案した (Hayashi et al., 2020)。

③偏波情報を用いた水蒸気、液水、雪水量推定に関する研究

- ・ レーダーの位相データから湿度の関数である屈折率の時間変化量を抽出する手法を開発し、降水分布や気象官署の地上データとの対応を調べた。
- ・ 霰粒子のマイクロ CT 画像を利用して、霰粒子モデルのデータセットを作成しその偏波特性の計算を行った。

④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

- ・ データ品質の調査結果に基づいて、固有の問題に対処するための手法を開発し、顕著事例の解析を実施した。
- ・ 埼玉大に設置の X バンド MP-PAWR のデータを NICT より入手。品質確認に着手した。
- ・ 令和元年東日本台風に伴って発生した千葉県市原市における竜巻について、フェーズドアレイレーダーのデータ解析を行った。その結果、積乱雲内に存在していたメソサイクロンと、その後方の下降気流に伴って新たに地上付近で発生した径の小さな渦が上下に結合し、強化され、被害域に強い竜巻渦をもたらす原因となったことが明らかになった。この知見をまとめた論文 (Adachi and Mashiko, 2020) が Geophysical Research Letters 誌のハイライト論文となり、報道発表・お知らせを実施した。

計画に対する進捗度及び変更点

(1) 当初計画に対する進捗度 (計画した線表通りに研究が進捗しているかを記述)

概ね、予定通り進捗している。

(2) 当初計画から変更した点 (研究手法の変更点など)

特になし。

本課題の成果から施策や他の研究への波及状況

(外部機関や所内外の研究課題への波及効果)

(副課題 1)

- ひまわり 8 号台風機動観測を用いた大気追跡風算出環境および雲物理量推定手法は科学研究費補助金基盤研究 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」(研究代表者 堀之内准教授、北海道大学) 及び富山大安永教授との共同研究「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」において、構造変化プロセス及び台風内部の変動過程に関する解析研究に引き続き利用されている。

(副課題 2)

- 線状降水帯の客観的な検出手法やその解析結果は、本庁の線状降水帯予測精度向上タスクフォーシスのプロジェクト「B-3 線状降水帯解析・検出」と「C-1 線状降水帯となる可能性のある降水域を検知し、気象情報で注意喚起」に活用された。
- 線状降水帯の解析結果は、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」テーマ V (線状降水帯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)における線状降水帯の発生予測技術の開発に引き続き活用された。
- 令和元年房総半島台風(2019 年台風第 15 号)や近畿地方に暴風をもたらした 2018 年台風第 21 号の高解像度シミュレーション結果と解析結果は、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」において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が検討されている。

(副課題 3)

- J R 東日本との共同研究の一環で、冬季日本海側のドップラーレーダーを用いた突風探知において世界初の AI 実装が実現された。

(副課題 4)

気象庁大気海洋部が取り組んでいる下記の技術開発に対して、当課題で得られた知見を提供することで、その推進に寄与した。

- 二重偏波パラメータ等の新たなレーダーデータの利活用に向けた技術開発(高精度降水強度推定、降水粒子判別、品質管理など)
- 各種ノウキャスト・数値予報の改善に寄与する技術開発(発雷指標の開発、水蒸気の時間変動の推定、竜巻等顕著現象の詳細な解析手法など)

他省庁予算及び共同研究等からの反映状況

(他省庁予算等研究課題から本課題への波及効果)

(1) 他省庁予算

特記事項無し

(2) 共同研究

(副課題 1)

- 北海道大学との共同研究において、ひまわり 8 号観測で得られた輝度温度データにみられる対流バーストに伴うアンビルの先端での放射状に広がる振る舞いについて、2017 年台風第 21 号を例に現象を抽出し、理想化数値実験を用いて以下の物理的解釈を行った：アンビルの先端は有限振幅重力波として解釈でき、そこではアウトフローと重力波の位相速度がほぼ一致する。対流バーストに伴うマスフラックスには限りがあるため、アンビル先端の伝搬速度は次第に減少し、先端は不明瞭になる。一方、重力波はそのまま伝搬しアンビルの先端と分離する。重力波の伝搬後面では温度の上昇域が広がる。以上、得られた知見は副課題 1 における台風内部変動過程の解明に貢献した。
- 富山大学との共同研究において、ひまわり 8 号観測で得られた輝度温度及び大気追跡風データを用いて、北太平洋西部海域における熱帯低気圧における輝度温度と上層水平風の日周期をスペクトル解析により調査した。熱帯低気圧外側、中心から 300~500 km において輝度温度と動径風に有意な日周期及び相互に干渉することが可能であるという結果が得られた。日周期のシグナルは移流より速く、中心から外側の領域に向かって伝播することが推測された。以上、得られた知見は副課題 1 における台風内部変動過程の解明に貢献した。

(副課題 2)

- NICT との共同研究「水蒸気のリモートセンシングに関する研究開発」の一環として気象研究所で水蒸気観測を実施されており、データ取得・品質管理された水蒸気観測データをもとに降雪現象の大気水蒸気場の解析を行っている。
- 三重大学との共同研究「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」においてシチズンサイエンスデータの品質管理が行われており、その結果をもとに首都圏の降雪現象における大気・雲・降水過程の解析を進めている。
- 防災科研との共同研究「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」の一環として顕著な雪氷災害の事例解析が取り組まれており、解析手法を太平洋側の雪氷災害事例にも共有化している。(副課題 2) 富山大安永教授との共同研究「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」において、AMV データにより台風域における対流の日変化の特性に関する研究が行われ、比較的強い台風のレインバンド上において統計的に有意な日変化が検出された。また、この日変化と台風強度変化の関連が示唆された。

(副課題 3)

- J R 東日本との共同研究冬季日本海側の竜巻等突風に関する解析結果・深層学習を含めた探知手法を活用し、フェーズドアレイレーダーを念頭にした 3 次元竜巻自動探知の開発および XRAIN+ 空港気象ドップラーレーダーによる竜巻探知の検証を進めている。

(3) 公募型共同利用による研究

特記事項無し。

(4) 科学研究費補助金**(副課題 1)**

- 科学研究費補助金基盤研究 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」(研究代表者 堀之内准教授、北海道大学)において、2020 年台風第 9 号、第 10 号、第 14 号について、ひまわり 8 号による 30 秒観測を実施した。
- 科学研究費補助金基盤研究 A 「世界最高水準の衛星海面フラックスデータが明らかにする台風と海洋の関係」(研究代表者 富田特任助教、名古屋大学)において、衛星海面フラックスデータセット内の台風域における海面水温、気温、比湿、海上風及び潜熱プロダクトを非静力学大気波浪海洋結合モデルの出力と比較し、検証した結果を査読論文として出版した。
- 科学研究費補助金基盤研究 B 「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」(研究代表者 岡本室長、気象観測研究部)にて開発した渦位インバージョン解析ツールを用いて、2018 年台風第 12 号と上層寒冷渦との相互作用及び 2018-2019 年の台風と偏西風との相互作用に関する研究を実施している。
- 科学研究費補助金基盤研究 C 「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」(研究代表者 小山亮、気象庁予報部予報課、台風・災害気象研究部併任)にて開発した 1D-Var システムを用いて、2018 年台風第 24 号の暖気核発達プロセスについて、非静力学大気波浪海洋結合モデルを用いた数値シミュレーション結果等を組み合わせることにより、調査している。
- 科学研究費補助金新学術領域研究「台風・爆弾低気圧の予測可能性とスケール間相互作用」(研究代表者 川村隆一教授、九州大学)において、日本付近の台風の理解に重要となる非断熱過程と傾圧過程の相互作用に関する事例解析・統計的解析を実施している。

(副課題 2)

- 科学研究費補助金基盤研究 (C) 「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」において、令和元年房総半島台風に伴う突風の解析やアメダスを用いた突風の統計解析を行った。
- 科学研究費補助金若手研究 (B) 「首都圏の高精度雨雪判別手法確立に向けた降雪機構の実態解明」においてデータ整理・品質管理を行ったシチズンサイエンスデータを含む大気・雲・降水観測デ

ータを用いて、首都圏の降雪現象の発生前から終焉に至るまでの過程の事例解析を実施した。

- ・ 科学研究費補助金若手研究「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」においてNHM-LETKFの実行環境を整備し、首都圏の大雪事例のアンサンブルシミュレーションを実施した。

(副課題3)

- ・ 研究費助成事業・若手研究(B)「フェーズドアレイレーダーを用いた台風環境下における竜巻発生メカニズムの解明」においてデータを取得した、令和元年10月12日市原竜巻について、フェーズドアレイレーダーによる竜巻渦の3次元自動探知実験を実施した。

(副課題4)

- ・ 科学研究費補助金基盤研究C「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—大粒の雨はどこで生成するか—」では経験式に基づくことなく二重偏波レーダーで観測される偏波パラメータだけから理論的に雨滴粒径分布のパラメータを推定する手法の開発中で、そのプロトタイプを完成させた。これを用いたシミュレーションの結果、気象庁が利用しているC-bandの周波数帯のレーダーでは水の複素屈折率の温度依存性が他の周波数に比べて大きいこと、偏波パラメータも温度によって変化することが判明した。そこで雨滴の温度に対する雨滴粒径分布のパラメータの推定精度の感度について調査を行なった。これらの結果は実データを用いる本課題にも利用していく計画である。
- ・ 科学研究費助成事業・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」において、竜巻飛散物を含めた粒子判別アルゴリズムのプロトタイプを開発し、その結果を用いて、ダウンバーストの発生前兆に係る調査及び夏季積乱雲内部の降水粒子の分布構造と三次元的電荷構造との比較を実施した。ここで開発した手法及び得られた知見は、本課題にも利用する計画である。

今後の課題

(副課題1)

台風急発達だけでなく、急衰弱予測の精度向上に対する要望が高まっている。また日本上陸時における台風に伴う強風や大雨分布の詳細な解析・予測可能性に関する研究も実施する必要がある。一方で人的・物的資源が足りず、強風分布に関しては、人員増の要望を提出してはいるものの、実現していない。

(副課題3)

- ・ 突風探知アルゴリズムのより広い範囲(様々な季節・地域)への適用を目指し、高精度かつ高頻度に低層をスキャンする空港気象ドップラーレーダーの利用検討が重要である。そのため空港気象ドップラーレーダーの過去データの速やかな入手やリアルタイムでの受信が重要であり、そのためには気象研究所のシステムへのオンライン入手が最も望ましい。
- ・ 突風の発生頻度が高くなる冬季に日本海沿岸に設置していた可搬型ドップラーレーダーは、その特性を生かし、フェーズドアレイレーダーとも連携しながら、関東平野における夏季擾乱の高速・高分解能観測・解析をすることが必要である。

(副課題4)

- ・ ①については今後地上観測などと比較し、粒径分布推定手法の検証を行う必要がある。ただし新型コロナウイルスの動向によっては地上観測データの取得が限定的となる可能性もある。
- ・ ②については、粒子判別の検証のためビデオゾンデによる同期観測や、機動的な三次元構造の観測を実現する三次元降水粒子撮影装置の導入を検討する必要がある。また本研究課題の成果に基づき今後気象庁の現業用レーダーが順次二重偏波化されることから、関東以外の顕著現象の研究が推進される見込みである。この研究のため、全国の現業レーダーのデータを気象研で利用できる環境を構築する必要がある。この実現に向け現在本庁の担当部署との調整を進めている。
- ・ ③については実況の天気と比較するために準リアルタイムで屈折率変動を表示するシステムを開発する必要がある。
- ・ ④については立体解析技術の開発と評価を今後進めていく必要がある。

研究成果リスト

(1) 査読論文 : 17 件

1. Yanase, W., K. Araki, A. Wada, U. Shimada, M. Hayashi, and T. Horinouchi, 2021: Multiple dynamics of asymmetric precipitation in Typhoon Hagibis (2019) during extratropical transition. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. (submitted)
2. Takahisa KOBAYASHI, Mitsuharu NOMURA, Ahoro ADACHI, Soichiro SUGIMOTO, Nobuhiro TAKAHASHI, Hiromaru HIRAKUCHI, 2021: Retrieval of Attenuation Profiles from the GPM Dual-frequency Radar Observations. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **99**, 603-620.
3. Wada, A., and J. C. L. Chan, 2021: Increasing TCHP in the western North Pacific and its influence on the intensity of FAXAI and HAGIBIS in 2019. *SOLA*, **17A**, 29-32.
4. Ono, K., M. Kunii, and Y. Honda, 2021: The regional model - based Mesoscale Ensemble Prediction System, MEPS, at the Japan Meteorological Agency. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **147**, 465-484.
5. Araki, K., T. Kato, Y. Hirockawa, and W. Mashiko, 2021: Characteristics of Atmospheric Environments of Quasi-Stationary Convective Bands in Kyushu, Japan during the July 2020 Heavy Rainfall Event. *SOLA*, **17**, 8-15.
6. Hayashi, S., A. Umehara, N. Nagumo, and T. Ushio, 2021: The relationship between lightning flash rate and ice-related volume derived from dual-polarization radar. *Atmospheric Research*, **248**, 105166.
7. Hirockawa Y., T. Kato, K. Araki, and W Mashiko, 2020: Characteristics of an Extreme Rainfall Event in Kyushu District, Southwestern Japan in Early July 2020. *SOLA*, **16**, 265-270.
8. Yanase, W., U. Shimada and N. Takamura, 2020: Large-scale conditions for reintensification after the extratropical transition of tropical cyclones in the western North Pacific Ocean. *Journal of Climate*, **33**, 10039-10053.
9. Bandholnopparat, K., M. Sato, T. Adachi, T. Ushio, and Y. Takahashi, 2020: Estimation of the IC to CG Ratio Using JEM-GLIMS and Ground-based Lightning Network Data. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, **125**.
10. Adachi, T., and W. Mashiko, 2020: High Temporal - Spatial Resolution Observation of Tornadogenesis in a Shallow Supercell Associated With Typhoon Hagibis (2019) Using Phased Array Weather Radar. *Geophysical Research Letters*.
11. Kawaguchi, M., T. Tamura, and W. Mashiko, 2020: A numerical investigation of building damage during the 6 May 2012 Tsukuba tornado using hybrid meteorological model/engineering LES method. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, **204**, 104254.
12. Hirockawa, Y., T. Kato, H. Tsuguti, and N. Seino, 2020: Identification and classification of heavy rainfall areas and their characteristic features in Japan. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **98**, 835-857.
13. Takamura, N., and A. Wada, 2020: Unusual Characteristics of Extratropical Transition of Typhoons in August 2016. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **98**, 691-706.
14. Fukuda K., K. Yasunaga, R. Oyama, A. Wada, A. Hamada, and H. Fudeyasu, 2020: The diurnal cycle of clouds in tropical cyclones over the western North Pacific Basin. *SOLA*, **16**, 109-114.

15. Wada, A, H. Tomita, S. Kako, 2020: Comparison of the third-generation Japanese ocean flux data set J-OFURO3 with numerical simulations of Typhoon Dujan (2015) traveling south of Okinawa. *Journal of Oceanography*, **76**, 419-437.
16. 北島尚子, 津口裕茂, 2020: 2016年8月末の日本海の低気圧の発達と時間発展: 中緯度の流れと台風1610号(Lionrock)の相互作用. *気象研究所研究報告*, **68**, 1-19.
17. 北島尚子, 黒良龍太, 長田栄治, 杉原良, 2020: 2018年7月5~8日の梅雨前線豪雨におけるメソ α スケールの変化. *天気(論文・短報)*, **63**, 431-443.

(2) 査読論文以外の著作物(翻訳、著書、解説): 32件

1. Araki, K., 2020: Numerical simulation of heavy rainfall event associated with typhoon Hagibis (2019) with different horizontal resolutions. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Earth System Modelling*, **51**, 303-304.
2. Araki, K., 2020: Numerical simulation of potential impact of aerosols on heavy rainfall event associated with typhoon Hagibis (2019). *CAS/JSC WGNE Research Activities in Earth System Modelling*, **51**, 403-404.
3. Wada, A., 2020: Atmosphere-wave-ocean coupled-model simulation on rapid intensification of Typhoon Hagibis (2019). *Research Activities in Earth System Modelling*, **50**, 9-15.
4. Wada, A., 2020: Sensitivity experiments on axisymmetrization of Typhoon Faxai (2019) just before landfalling in Japan simulated by atmosphere-ocean coupled model. *Research Activities in Earth System Modelling*, **50**, 9-13.
5. Wada, A., 2020: Atmosphere-wave-ocean coupled-model simulation on Typhoon Bualoi(2019) and formation of quasi-linear convective system around Boso Peninsula. *Research Activities in Earth System Modelling*, **50**, 9-07.
6. Wada, A., and K. Okamoto, 2020: Atmosphere-wave-ocean coupled-model simulation on the effect of Himawari-8 all-sky infrared radiances assimilation on the track simulation of Typhoon Jongdari (2018). *Research Activities in Earth System Modelling*, **50**, 9-17.
7. Wada, A., 2020: Rainfall simulations of Typhoons Kammuri and Phanfone landfalling in the Philippines. *Research Activities in Earth System Modelling*, **50**, 9-11.
8. Wada, A., H. Yoshimura, and M. Nakagawa, 2020: The effect of the cloud-water conversion rate in the cumulus parameterization on the simulation of Typhoon Lionrock (2016). *Research Activities in Earth System Modelling*, **50**, 9-09.
9. 廣川康隆, 加藤輝之, 2021: 集中豪雨をもたらす線状降水帯. *ながれ*, **40**, 3-8.
10. 足立透, 益子渉, 2021: 令和元年台風第19号に伴って発生した市原竜巻の3次元レーダー解析. 台風研究会「台風災害の実態解明と台風防災・減災に資する方策」, **2020K-10**, 15-18.
11. 和田章義, 2021: 2018-2019年の台風における海洋の役割. 台風研究会「台風災害の実態解明と台風防災・減災に資する方策」, **2020K-10**, 97-102.
12. 足立透, 2021: 最新レーダー技術を用いた台風に伴う竜巻の新しい研究. *日本風工学会誌*, **Vol. 46, No. 1(No. 166)**, 19-28.
13. 荒木健太郎, 2020: 本だな「激甚気象はなぜ起こる」坪木和久 著. *天気*, **67**, 719.
14. 佐藤陽祐, 當房豊, 山下克也, 荒木健太郎, 岩崎杉紀, 三隅良平, 大竹秀明, 茂木信宏, 齋藤泉, 川合秀明, 中島孝, 中野諭, 森樹大, 橋本明弘, 郭威鎮, 勝山祐太, 瀬戸里枝, 古藤慎之, 山田怜史, 折笠成宏, 田尻拓也, 遠藤幸生, 近藤誠, 大畑祥, 松嶋俊樹, 2020: 2019年度「エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究会」報告. *天気*, **67**, 665-670.

15. 荒木健太郎, 2020: 魔法のような空の風景. *魔法のような空の風景*, インプレス, 28pp, ISBN: 978-4295009313.
16. 楠 研一, 2020: 冬季日本海側の竜巻等突風の観測. *気象研究ノート*, **243**, 77-98.
17. 益子 渉, 2020: 2012年5月6日に発生したつくば竜巻. *気象研究ノート*, **243**, 157-165.
18. 益子 渉, 2020: 2006年台風第13号に伴って発生した延岡竜巻. *気象研究ノート*, **243**, 148-156.
19. 松井正宏, 林泰一, 鈴木修, 村井博一, 2020: 竜巻のスケール. *気象研究ノート「竜巻を識る」*, **第243号**, 227-234.
20. 鈴木修, 佐々浩司, 宮城弘守, 2020: 写真測量による竜巻の大きさ, 強度の評価. *気象研究ノート*, **第243号**, 246-250.
21. 鈴木修, 2020: 日本の竜巻. *気象研究ノート*, **第243号**, 33-41.
22. 山内洋, 佐藤英一, 鈴木修, 2020: 竜巻観測技術の展望. *気象研究ノート「竜巻を識る」*, **243**, 123-128.
23. 佐藤英一, 2020: 台風. *強風被害の変遷と教訓 第3版*. (submitted)
24. 荒木健太郎, 柳瀬亘, 北畠尚子, 黒良龍太, 2020: 大雨に対する地形の影響の評価. *令和元年度科学研究費助成事業・特別研究促進費「令和元年台風19号及び台風21号による広域災害に関する総合研究」報告書*, 49-50.
25. 荒木健太郎, 北畠尚子, 2020: 2019年10月25日関東大雨をもたらした降水システムとその発生環境場. *令和元年度科学研究費助成事業・特別研究促進費「令和元年台風19号及び台風21号による広域災害に関する総合研究」報告書*, 42-45.
26. 荒木健太郎, 柳瀬亘, 北畠尚子, 黒良龍太, 2020: 令和元年台風第19号による大雨の発生環境場. *令和元年度科学研究費助成事業・特別研究促進費「令和元年台風19号及び台風21号による広域災害に関する総合研究」報告書*, 41-42.
27. 足立透, 坪木 和久, 牛尾 知雄, 高橋暢宏, 川口航平, 瀬瀬丈晴, 岩波越, 楠研一, 松田知也, 新野宏, 中川勝広, 2020: 気象災害委員会・第52回メソ気象研究会合同研究会の報告. *天気*, **67(6)**, 31-35.
28. 和田章義, 2020: 特集 近年の台風の特徴と将来予測. *気象年鑑*, 3-29.
29. 荒木健太郎, 2020: 局地的大雨と集中豪雨の予測. *スクエア最新図説地学(八訂版)*, 196-197.
30. 吉田智, 2020: 雷放電三次元標定装置の開発と観測. *日本大気電気学会誌*, **Vol. 14, No. 1**, 3-10.
31. 小林 文明, 佐藤 英一, 高舘 祐貴, 松井 正宏, 木村 吉郎, ガヴァンスキ 江梨, 2020: 【速報】台風1919号(HAGIBIS)がもたらした強風災害について. *日本風工学会誌*, **45-2**, 126-130.
32. 日本風工学会風災害研究会, 2020: 風災害研究会2019年次報告. *日本風工学会誌*, **45-2**, 149-152.

(3) 学会等発表 : 55 件

1. Shimada, U., P. Reasor, R. Rogers, M. Fischer, J. Zawislak, J. Zhang, and F. Marks, Preference for upshear-left convection at upper levels for intensifying hurricane-strength storms, AMS 101st Annual Meeting, 2021年1月, アメリカ, オンライン
2. Adachi, T., A. Umehara, and W. Mashiko, Multi-Radar Observation of Tornadogenesis in a Shallow Supercell of Typhoon Hagibis (2019), AGU Fall Meeting 2020, 2020年12月, 米国, virtual
3. Wada, A., Warm ocean conditions and increased typhoon intensity in 2019, 日本地球惑星科学連合2020年大会, 2020年7月, オンライン

4. Araki, K., Observational study on characteristics of ground snow crystals in the metropolitan areas in Japan, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
5. Ichikawa, R., H. Ujihara, S. Satoh, J. Amagai, Y. Ohta, B. Miyahara, H. Munekane, T. Nagasaki, O. Tajima, K. Araki, T. Tajiri, H. Takiguchi, T. Matsushima, N. Matsushima, T. Momotani, and K. Utsunomiya, Development of novel ground-based microwave radiometer for earth science -results of the first measurements-, EGU General Assembly 2020, 2020年5月, オーストリア, ウイーン
6. 荒木健太郎, 風水害をもたらす気象, ジャパン SDGs アクションシンポジウム, 2021年3月, オンライン
7. 益子 涉, 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, 竜巻シンポジウム-藤田哲也博士生誕100年を記念して-, 2021年3月, 日本
8. 楠 研一, 足立透, 猪上華子, 鈴木修, 新井健一郎, 石津尚喜, 藤原忠誠, 鈴木博人, 冬季日本海側の竜巻等突風の観測と災害軽減に向けた研究開発, 東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会「竜巻シンポジウム」, 2021年3月, オンライン
9. 梅原章仁, 足立透, 益子涉, 山内洋, 二重偏波レーダーによる竜巻観測, 竜巻シンポジウム-藤田哲也博士生誕100年を記念して-, 2021年3月, 日本
10. 足立 透, 益子 涉, 梅原章仁, フェーズドアレイレーダーを用いた竜巻研究, 竜巻シンポジウム-藤田哲也博士生誕100年を記念して-, 2021年3月, 日本
11. 楠 研一, 足立透, 猪上華子, 鈴木修, 新井健一郎, 石津尚喜, 藤原忠誠, 鈴木博人, PRISM 成果紹介「竜巻自動予測・情報提供システムの開発」, AI 研究会「激しい大気現象の研究・防災における人工知能の利活用と今後の展望」, 2021年3月, つくば市
12. 廣川康隆, 加藤輝之, 荒木健太郎, 益子涉, 令和2年7月豪雨の九州における降水の特徴, 第54回メソ気象研究会, 2021年3月, オンライン
13. 荒木健太郎, 加藤輝之, 廣川康隆, 益子涉, 令和2年7月豪雨で九州に大雨をもたらした線状降水帯の大気環境場の特徴, 第54回メソ気象研究会, 2021年3月, オンライン
14. 荒木健太郎, 柳瀬亘, 北畠尚子, 林修吾, 黒良龍太, 令和元年東日本台風に伴う大雨時の降水強化メカニズムのシミュレーション, 2020年度エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会, 2021年2月, オンライン
15. 楠 研一, 足立透, 猪上華子, 鈴木修, 新井健一郎, 石津尚喜, 藤原忠誠, 鈴木博人, 深層学習を用いた竜巻自動探知システムの開発, 気象庁施設等機関研究報告会, 2021年2月, 東京都
16. 梅原章仁, 足立透, 益子涉, 山内洋, 二重偏波レーダーで捉えた竜巻飛散物の時空間分布～2019年10月12日千葉県市原市に生じた竜巻を対象として～, 東京工芸大学・風工学共同研究拠点・研究集会「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」, 2021年2月, 日本
17. 足立透, 益子涉, フェーズドアレイ気象レーダーによる市原竜巻の詳細解析, 東京工芸大学・風工学共同研究拠点・研究集会「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」, 2021年2月, 日本
18. 荒木健太郎, 雪結晶で読み解く雲の心, 2020年度積雪観測&雪結晶撮影講習会, 2021年2月, オンライン
19. 梅原章仁, 南雲信宏, 山内洋, 二重偏波レーダーの降水粒子判別結果から考察するダウンバースト発生前兆, 第15回航空気象研究会, 2021年2月, 日本
20. 益子涉, 廣川康隆, 荒木健太郎, 令和2年7月豪雨の特徴ー球磨川流域に記録的大雨をもたらした線状降水帯の構造と発生過程ー, 令和2年度気象研究所研究成果発表会, 2020年12月, オンライン
21. 足立透, フェーズドアレイレーダーを用いた研究の最前線, 気象キャスターネットワークオンライン勉強会, 2020年11月, オンライン

22. 和田章義、柳瀬亘、林昌宏、2020年台風第10号(Haishen)の数値シミュレーション、第22回非静力学モデルに関するワークショップ、2020年11月、オンライン、オンライン
23. 荒木健太郎、雲を愛する技術、江丹別熱中小学校、2020年11月、旭川市
24. 荒木健太郎、加藤輝之、廣川康隆、益子渉、令和2年7月豪雨をもたらした線状降水帯の発生環境場、日本気象学会2020年度秋季大会、2020年10月、オンライン
25. 梅原章仁、足立透、益子渉、山内洋、2019年10月12日に市原市に被害をもたらした竜巻の二重偏波特性について(その2)、日本気象学会2020年度秋季大会、2020年10月、オンライン
26. 益子 渉、令和元年房総半島台風(T1915)に伴う強風の特徴、日本気象学会2020年度秋季大会、2020年10月、オンライン
27. 柳瀬亘、荒木健太郎、和田章義、嶋田宇大、林昌宏、令和元年台風第19号の降水の非対称化メカニズム~その2、日本気象学会2020年度秋季大会、2020年10月、オンライン
28. 小司禎教、清野直子、凌風丸による2020年梅雨期東シナ海ゾンデ観測、日本気象学会2020年度秋季大会、2020年10月、オンライン
29. 足立透、梅原章仁、益子渉、2019年10月12日市原竜巻の3次元渦形成過程について、日本気象学会2020年度秋季大会、2020年10月、オンライン
30. 荒木健太郎、柳瀬亘、北島尚子、林修吾、黒良龍太、令和元年台風第19号における降水強化メカニズム、日本気象学会2020年度秋季大会、2020年10月、オンライン
31. 梅原章仁、南雲信宏、山内洋、二重偏波レーダーで捉えたダウンバースト発生前後における降水粒子の時空間分布特性、日本気象学会2020年度秋季大会、2020年10月、オンライン
32. 林昌宏、岡本幸三、DARDAR プロダクトとひまわり8号観測を用いたRTTOV氷雲放射スキームの評価、日本気象学会2020年度秋季大会、2020年10月、オンライン
33. 廣川康隆、益子渉、荒木健太郎、令和2年7月豪雨により九州地方で生じた線状降水帯の特徴、日本気象学会2020年度秋季大会、2020年10月、オンライン
34. 楠 研一、鈴木博人、岸保・立平賞受賞記念講演「ドップラーレーダーを用いた突風災害の軽減に向けた研究開発と鉄道の安全運行のための社会実装」、日本気象学会2020年度秋季大会、2020年10月、オンライン
35. 荒木健太郎、岩永哲、雲でわかる!空のきもち、2020年度広島市江波山気象館講演会、2020年10月、オンライン
36. 荒木健太郎、沖大幹、今こそ知りたい、気象と災害:空と雲の”気持ち”から考えてみよう、国連大学オンライントークイベント、2020年9月、オンライン
37. 柳瀬亘、荒木健太郎、和田章義、嶋田宇大、林昌宏、堀之内武、令和元年東日本台風の降水非対称化メカニズム、台風研究会「台風災害の実態解明と台風防災・減災に資する方策」、2020年9月、オンライン
38. 和田章義、2018-2019年の台風における海洋の役割、台風研究会「台風災害の実態解明と台風防災・減災に資する方策」、2020年9月、京都府宇治市
39. 足立透、益子渉、梅原章仁、令和元年台風第19号に伴って発生した市原竜巻の3次元レーダー観測、台風研究会、2020年9月、京都府宇治市
40. 和田章義、2020年夏の大規模場の解析、今後の台風予想、台風診断ミーティング2020、2020年8月、千葉県柏市
41. 荒木健太郎、雲科学入門、日本気象学会第54回夏季大学、2020年8月、オンライン
42. 柳瀬亘、荒木健太郎、和田章義、嶋田宇大、林昌宏、台風第19号に関する数値シミュレーション、「令和元年台風19号及び台風21号による広域災害に関する総合研究」成果報告会、2020年7月、オンライン
43. 市川 隆一、氏原 秀樹、佐藤 晋介、太田 雄策、宮原 伐折羅、宗包 浩志、長崎 岳人、田島 治、荒木 健太郎、田尻 拓也、瀧口 博士、松島 健、松島 喜雄、桃谷 辰也、宇都宮 健

志，次世代高感度マイクロ波放射計の開発-初期観測成果-，JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月，オンライン

44. 北島尚子、荒木健太郎，2019年10月25日の東日本の大雨に対する総観場の影響，日本気象学会2020年度春季大会，2020年5月，オンライン
45. 荒木健太郎，柳瀬亘，北島尚子，黒良龍太，令和元年台風第19号による大雨の環境場と地形の影響，日本気象学会2020年度春季大会，2020年5月，オンライン
46. 荒木健太郎，北島尚子，2019年10月25日関東大雨のメソスケール環境場，日本気象学会2020年度春季大会，2020年5月，オンライン
47. 梅原章仁，嶋田宇大，2019年台風第19号の降水過程に関する二重偏波レーダーを用いた解析，日本気象学会2020年度春季大会，2020年5月，オンライン
48. 柳瀬亘，荒木健太郎，和田章義，嶋田宇大，林昌宏，令和元年台風第19号の降水の非対称化メカニズム，日本気象学会2020年度春季大会，2020年5月，オンライン
49. 和田章義，2019年台風シーズンにおける大気海洋環境場の特徴，日本気象学会2020年度春季大会，2020年5月，オンライン
50. 足立アホロ，小林隆久，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形状パラメータの推定（その2），日本気象学会2020年度春季大会，2020年5月，オンライン
51. 梅原章仁，山内洋，2019年10月12日に市原市に被害をもたらした竜巻の二重偏波特性，日本気象学会2020年度春季大会，2020年5月，オンライン
52. 益子 渉，2019年日本に暴風・竜巻等突風をもたらした台風の特徴，日本気象学会2020年度春季大会，2020年5月，オンライン
53. 楠研一，足立透，石津尚喜，猪上華子，新井健一郎，川又幸，藤原忠誠，鈴木博人，AIを用いた竜巻等突風の自動予測・情報提供システムの開発 -開発の現状-，日本気象学会2020年度春季大会，2020年5月，オンライン
54. 足立透，益子渉，フェーズドアレイ気象レーダーで観測された2019年10月12日市原竜巻の発生メカニズムについて，日本気象学会2020年度春季大会，2020年5月，オンライン
55. 猪上華子，新井健一郎，楠研一，足立透，石津尚喜，藤原忠誠，鈴木博人，庄内平野に突風をもたらす渦のIQデータを用いた超解像の試み，日本気象学会2020年度春季大会，2020年5月，オンライン

受賞・報道・アウトリーチ活動等

(1) 受賞 3件

1. 楠 研一 2020年度日本気象学会 岸保・立平賞、2020年5月
2. 足立透、益子渉 Editor's Highlight、米国地球物理学会論文誌 Geophysical Research Letters (GRL 誌)、令和2年10月
3. 気象研究所 JR東日本鉄道事業本部長感謝状（機関賞）、2021年1月

(2) 報道 77件

1. 荒木健太郎 J-WAVE (GROWING REED) 「岡田准一が 雲の神秘 に迫る！」2020年4月26日
2. 荒木健太郎 日本経済新聞「市民の日常 科学研究担う SNSの投稿で新発見も」2020年5月10日
3. 荒木健太郎 中日新聞「<Meet STEAM> 気象庁気象研究所・荒木健太郎さん」2020年5月17日
4. 荒木健太郎 やる気ラボ「「天気の子」監修、雲研究者・荒木健太郎さんの雲スイーツのワケ。やる気の源泉をたどる！」2020年5月5日
5. 荒木健太郎 毎日小学生新聞「積乱雲のしくみと観天望気について」2020年5月9日
6. 荒木健太郎 徳島新聞「「楽しい防災」で関心を」2020年6月10日
7. 荒木健太郎 茨城放送 (CONNECT) 「ほっとボイス 雲研究者・荒木健太郎さん」2020年6月15日
8. 荒木健太郎 文化放送 (ロンドンブーツ1号2号田村淳の NewsCLUB) 「この夏、空を見るのが楽しくなる“雲の愛で方”」2020年6月27日
9. 荒木健太郎 毎日小学生新聞「疑問氷解 環天頂アーク (逆さ虹) は、どんな条件のときに発生

しますか」2020年6月2日

10. 荒木健太郎 読売新聞（大阪版）「シチズンサイエンスによる雪結晶観測について」2020年6月3日
11. 荒木健太郎 NHK Eテレ「すごい宿題 荒木健太郎」2020年6月6日
12. 荒木健太郎 NHK「合言葉は“できるしこ”～豪雨被災地に行けなくてもできること」2020年7月10日
13. 荒木健太郎 Jタウンネット「まるで恐竜の行列... 海上に出現した謎の雲が話題→どういう現象？専門家に聞いてみた」2020年7月13日
14. 荒木健太郎 日本経済新聞電子版（U22）「虹色の彩雲・雪の結晶… 美しき「雲の科学」 気象庁 気象研究所 荒木健太郎（1）」2020年7月17日
15. 荒木健太郎 NHK WORLD-JAPAN（Science View）「Can Microbes Cause Rain? Tackling a Weather Mystery」2020年7月1日
16. 荒木健太郎 NHK（NHK 就活応援ニュースゼミ）「注意すべきは『天気の子』のあの雲！雲研究者が教える危険な雲の見分け方」2020年7月21日
17. 荒木健太郎 日本経済新聞電子版（U22）「「天からの手紙」を解説 雨か雪か、雲の科学で考える 気象庁 気象研究所 荒木健太郎（2）」2020年7月23日
18. 荒木健太郎 日本経済新聞電子版（U22）「みんなでパチリ、雪結晶プロジェクト 雲の科学に活用 気象庁 気象研究所 荒木健太郎（3）」2020年7月27日
19. 荒木健太郎 サンデー毎日（2020年8月9日増大号）「雲の形でゲリラ豪雨を知る」2020年7月28日
20. 荒木健太郎 日本経済新聞電子版（U22）「数学好きが「最高の雲」に出会うまで 雲の科学への道 気象庁 気象研究所 荒木健太郎（4）」2020年7月30日
21. 荒木健太郎 読売テレビ（かんさい情報ネット ten.）「災害をもたらす雲の研究について」2020年7月31日
22. 荒木健太郎 NHK（NHK 就活応援ニュースゼミ）「防災意識を高めるために 雲研究者・荒木健太郎さんが本当に伝えたいコト」2020年7月4日
23. 荒木健太郎 NHK「【すごい「こたえ」！】#3 雲研究者 荒木健太郎さん」2020年7月6日
24. 荒木健太郎 withnews「大雨避難、コロナ禍で一番大切なこと 対策集を作った本当の狙い」2020年7月6日
25. 荒木健太郎 JST（Science Window）「【with/post コロナ社会に生きる】雲の「心」を読み解き気象災害に備える <荒木健太郎さんインタビュー>」2020年8月28日
26. 荒木健太郎 朝日新聞「（もっと教えて！ドラえもん）形いろいろ、雲の正体は？」2020年8月2日
27. 荒木健太郎 読売新聞（サイエンス Human）「「雲目線」で頻繁ツイート…気象庁気象研究所研究官 荒木健太郎さん 35」2020年8月30日
28. 荒木健太郎 日本経済新聞電子版（U22）「「ゲリラ豪雨」被害減らす新習慣 防災は雲の科学から 気象庁 気象研究所 荒木健太郎（最終回）」2020年8月3日
29. 荒木健太郎 ZIP-FM（High!MORNING!）「積乱雲の観天望気について」2020年9月18日
30. 荒木健太郎 LOVE FM（Top Of The Morning）「Daily Scrapbook 雲との関わり方」2020年9月3日
31. 荒木健太郎 J-WAVE（Heart to Heart）「異常気象が多発する時代」2020年10月18日
32. 荒木健太郎 NHK（BS8K）「8Kアースウォッチャー「白い雲の惑星」」2020年10月4日
33. 荒木健太郎 毎日新聞（特集ワイド）「天気急変、教えて雲博士 知識が防災に役立つ 気象庁研究官・荒木健太郎さん」2020年10月6日
34. 荒木健太郎 テレビ朝日（ABEMA ヒルズ）「まるで「アナ雪」の世界観 新型コロナの影響で閉館となった旭川「雪の美術館」復活を望む声、ネットで広まる」2020年11月10日
35. 荒木健太郎 NHK（ニュースウォッチ9）「「穴あき雲」関東や四国など各地の空で目撃相次ぐ」2020年11月30日
36. 荒木健太郎 テレビ朝日（AbemaPrime）「映画『天気の子』監修の“雲研究者”が語る一見“役に立たない研究”が必要なワケ 雲が防災につながる？」2020年12月10日
37. 荒木健太郎 ジェイタメ「『天気の子』監修の研究者に聞く雲の魅力」2020年12月13日

38. 荒木健太郎 フジテレビ (ノンストップ!) 「天から送られた手紙」 2020年12月23日
39. 荒木健太郎 FNN PTIME 「市民参加型の降雪観測研究「#関東雪結晶」について」 2020年12月24日
40. 荒木健太郎 KAB 熊本朝日放送 「7月豪雨の線状降水帯 九州最大規模 長さ280キロ13時間」 2020年12月24日
41. 荒木健太郎 KBC 九州朝日放送 「7月豪雨は九州で発生した最大規模の線状降水帯」 2020年12月24日
42. 荒木健太郎 フジテレビ (とくダネ!) 「市民参加型の降雪観測研究「#関東雪結晶」について」 2020年12月24日
43. 荒木健太郎 読売新聞 「雪結晶観測について」 2020年12月24日
44. 荒木健太郎 日本経済新聞 「九州の7月豪雨、線状降水帯の発生が最多 気象研」 2020年12月24日
45. 荒木健太郎 朝日新聞 (九州・山口・沖縄地方向け版) 「熊本豪雨 近年最大の線状降水帯 今年7月 東西280キロは13時間停滞」 2020年12月25日
46. 荒木健太郎 テレビ朝日 (グッド! モーニング) 「かなとこ雲について」 2020年12月28日
47. 荒木健太郎 西日本新聞 「7月豪雨「小低気圧」が影響 大量の水蒸気流入、最大規模の線状降水帯」 2020年12月29日
48. 荒木健太郎 J-WAVE (GOOD NEIGHBORS) 「大雪をもたらす雲の仕組みと降雪観測研究について」 2021年1月12日
49. 荒木健太郎 読売テレビ (情報ライブ ミヤネ屋) 「雪の重さについて」 2021年1月12日
50. 荒木健太郎 日本経済新聞 「山梨で「幻日」を観測」 2021年1月12日
51. 荒木健太郎 日本テレビ (news every.) 「飛行機雲について」 2021年1月27日
52. 荒木健太郎 毎日新聞 「特集ワイド: 10万枚の「#関東雪結晶」 市民がスマホで撮影、降雪予測の精度向上」 2021年1月29日
53. 荒木健太郎 withnews 「犯人は「線状降水帯」だった! 予測が難しい「集中豪雨」備えは?」 2021年1月9日 2021年2月3日
54. 荒木健太郎 BAYFM (A-LABO INDEX) 「第226回 雲研究者・気象庁気象研究所台風・災害気象研究部 第二研究室研究官 荒木健太郎さん」
55. 荒木健太郎 BAYFM (A-LABO INDEX) 「第226回 雲研究者・気象庁気象研究所台風・災害気象研究部 第二研究室研究官 荒木健太郎さん」 2021年2月10日
56. 荒木健太郎 BLOGOS 「なぜ「日本海側」に大雪がよく降るの? 太平洋側も油断してはならない2~3月の雪対策 - 『天気の子』監修の気象庁・荒木健太郎さん聞き書き」 2021年2月17日
57. 荒木健太郎 withnews 「今年のドカ雪を「寒気」の気持ちになって解説「日本海は熱湯風呂」」 2021年2月17日
58. 荒木健太郎 Honda kids 「春一番はいつふく? なぜふく? 知っておきたい「風」のふしぎ」 2021年2月18日
59. 荒木健太郎 数学セミナー (2021年3月号) 「数学トラヴァース 気象の理論と観測のはざまにある数理/荒木健太郎氏 (雲研究者, 気象庁気象研究所) にきく」 2021年3月1日
60. 荒木健太郎 産経新聞 (産経子どもニュース) 「雪の結晶 雪は天からの手紙」 2021年3月4日
61. 荒木健太郎 日本テレビ (所さんの目がテン!) 「穴あき雲について」 2021年3月14日
62. 足立透、楠研一 「竜巻の動き 解明目指す」 読売新聞 2020年4月12日
63. 楠 研一ほか PR TIME 「インキュビット、気象庁「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」の研究開発委託先として採択」 2020年6月23日
64. 足立透 「大小の渦、結合し竜巻=台風時のメカニズム解明—気象研究所」 時事通信 2020年9月29日
65. 足立透 「台風に伴う竜巻発生メカニズム解明、気象研」 日本経済新聞 2020年9月29日
66. 足立透 「台風に伴う竜巻『世界初の解析』で分かったメカニズムとは」 NHK おはよう日本 2020年10月1日
67. 足立透 「台風に伴う竜巻、発生メカニズム解明 気象研」 日刊工業新聞 2020年10月5日
68. 足立透 「昨年の台風19号竜巻 発生メカニズム解明」 日本経済新聞 2020年10月5日
69. 楠 研一 秋田魁新聞 「AIで突風探知し規制」 2020年10月7日

70. 楠 研一ほか 岩手日報 「突風原因探知システム開発」2020年10月7日
71. 楠 研一ほか 新潟日報 「AIで突風探知 列車規制」2020年10月7日
72. 楠 研一ほか 読売新聞 「線路に突風 AIで予測」2020年12月24日
73. 楠 研一ほか NHK ニュース 「レーダーとAIで突風を予測 脱線事故受け安全対策強化」2020年12月24日
74. 嶋田 宇大 「台風15号 降雨域で局所的強風」読売新聞 2020年9月17日
75. 林 昌宏 「ひまわり8号を使った最新の台風研究」朝日新聞 2020年9月9日
76. 和田 章義 「2016年台風第10号の対流バーストについて」河北新報 2020年5月3日
77. 和田 章義 「台風第10号の予測について」NHK 2020年9月7日

(3) アウトリーチ活動

1. 廣川 康隆, 集中豪雨と線状降水帯. 未来の教室 STEAM ライブラリー, <https://www.pre.steam-library.go.jp/>. 2020年12月
2. 荒木健太郎, 雲科学入門. 日本気象学会第54回夏季大学. 2020年8月
3. 荒木健太郎, 今こそ知りたい、気象と災害: 空と雲の”気持ち”から考えてみよう. 国連大学オンライントークイベント. 2020年9月
4. 荒木健太郎, 雲でわかる! 空のきもち. 2020年度広島市江波山気象館講演会. 2020年10月
5. 荒木健太郎, 雲を愛する技術. 江丹別熱中小学校. 2020年11月.
6. 荒木健太郎, 雪結晶で読み解く雲の心. 2020年度積雪観測&雪結晶撮影講習会. 2021年2月
7. 荒木健太郎, 風水害をもたらす気象. ジャパンSDGsアクションシンポジウム. 2021年3月
8. 楠 研一ほか ニュートン別冊 ゼロからわかる人工知能 仕事編 増補第2版 「AIと竜巻予測」 (ニュートンプレス社) 2020年9月号
9. 足立透 「フェーズドアレイレーダーを用いた研究の最前線」 気象キャスターネットワーク講演会 2020年11月

(*) 特許権の取得

1. 楠 研一・足立透 「渦検出装置、渦検出方法、プログラム及び学習済モデル」(特許第6756889号) 登録日2021年8月31日

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：2年目／5年計画（令和元年度～令和5年度）

研究代表者：石井雅男（令和2年9月まで）、須田一人（令和2年10月から）
（気候・環境研究部 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

[気候・環境研究部] ○直江寛明、小林ちあき、原田やよい、今田由紀子、高藪 出、保坂征宏、遠藤洋和、尾瀬智昭

[全球大気海洋研究部] 石川一郎、高谷祐平、新藤永樹、吉田康平

[応用気象研究部] 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

[気候・環境研究部] ○保坂征宏、水田 亮、遠藤洋和、尾瀬智昭、田中泰宙、辻野博之、直江寛明、小林ちあき、原田やよい、今田由紀子

[全球大気海洋研究部] 行本誠史、石井正好、吉村裕正、出牛 真、吉田康平、神代 剛、石川一郎、高谷祐平、新藤永樹、齊藤直彬（～令和2年9月）、足立恭将、大島 長、山中吾郎、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、山口宗彦

（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

[気候・環境研究部] ○田中泰宙、坪井一寛、石島健太郎、藤田 遼

[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

[気候・環境研究部] ○辻野博之、遠山勝也、小杉如央、小野 恒

[全球大気海洋研究部] 山中吾郎、中野英之、豊田隆寛、坂本 圭、浦川昇吾

研究の動機・背景

（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の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、大気と海洋の物理およ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）

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・

長期再解析並びに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い、気候メカニズムを理解し、全球およ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、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同時に、その原因を解明する。これによって、「持続的開発目標」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。

研究の成果の到達目標

(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およ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)

- ① アジアモン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アモンスーンの季節～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を用いて、熱波、早魃、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機序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機序、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機序の解析、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)

- 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、地域スケールの予測情報の不確実性を評価・低減する。また、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、全球およ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（気候再解析）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100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、CMIP6 マルチモデル解析を行う。解析結果をモデル開発にフィードバックするとともに、上記の課題の気候変動メカニズムの理解に役立てる。

(副課題 3)

- ① 化学トレーサーの時空間変動に関する観測研究
 - 気象庁の大気観測所（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ーの連続観測を実施する。これらのデータと、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分解能観測データベースを作成する。
 - 温室効果ガス測定の標準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 化学トレーサー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、ラドンを指標とした清浄大気データの選別手法を確立し、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)

- 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ー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。

(副課題1)

- ① アジアモンスーンと台風の予測可能性評価
 - 現行の季節予測システム (JMA/MRI-CPS2) と他機関のモデルの再予報データの比較により、アジアモンスーンの再現性と予測可能性を調査する。さらに、それらと次期季節予測システム (CPS3) の再予報データの評価を通じて、モデルの改善に資する。
- ② 極端気象の実態と予測可能性の研究
 - 大気モデルの大規模アンサンブルの解析結果と比較しつつ、結合モデルでの初期値問題としての予測可能性を評価する。
- ③ 異常気象のメカニズム解明と要因に与える大規模場の影響評価
 - 大気循環場の変動と異常気象発生との関係やそれらのメカニズム解明を行う。
 - 気候系の監視や異常気象発生時の要因分析を行う。
 - 地球温暖化や十年規模変動と個別の異常気象の因果関係の評価を行う。
- ④ 気候データに関する研究
 - 次期長期再解析データの品質評価を行う。
 - 次期長期再解析の速報報告論文を執筆する。

(副課題2)

- ① タイムスライス温暖化予測システム
 - タイムスライス実験システムにより、過去と将来気候を対象とし、確実性表現も考慮した数値実験を行う。既存システムの結果と比較する。
 - 海洋のプロダクト作成に向けた作業に着手する。
- ② 十年規模気候変動予測
 - 実施した十年規模予測実験結果を解析し、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とともに、課題整理を行う。初期値化手法などを改良したシステムを開発する。
- ③ 気候再現実験
 - 整備した歴史的観測データを活用した気候再現実験システムを開発し、予備実験を行う。
- ④ CMIP実験の実施と気候変動メカニズム解明
 - 気象研究所地球システムモデル MRI-ESM2 を用い、CMIP6 におけるアンサンブル数を増やした追加実験を行い、その解析を通じて気候変動メカニズムの解明を図る。加えて、MRI-ESM2 による各種数値実験を行い、プロセスやイベント等に注目した気候変動要因の解明を進める。
 - CMIP をはじめとするマルチモデルデータ解析によるメカニズム解明を行う。
 - 得られた知見を『日本の気候 2020』に反映させ、温暖化予測情報への確信度情報の付与を含め、その向上に活かす。

(副課題3)

- ① 化学トレーサーの時空間変動に関する観測研究：
 - 綾里・与那国島・南鳥島・父島の気象観測所におけるラドン (^{222}Rn) と水素等の微量気体の観測、南鳥島のハロカーボン観測、綾里の酸素濃度連続観測をそれぞれ継続する。
 - 次世代のレーザー分光型大気観測システムを見据え、3成分 (CO_2 、 CH_4 、 CO) レーザー分光分析計の評価試験として南鳥島観測所にて従前装置との比較実験を行い、結果を評価する。
 - 気象庁と標準ガス比較実験を年2回実施し、これまでの実験結果も踏まえながら、気象庁から要請のある CO_2 標準ガス新校正装置の運用について技術支援を行う。
 - 南鳥島における気象庁のハロカーボン観測立ち上げの技術支援を行う。これまで気象研が実施してきたフラスコ分析との比較実験を行う。気象庁のフロン標準ガス分析を行い、観測スケール維持について支援を行う。
 - 実大気標準ガス充填設備を用いて、充填したガス容器の安定性試験を行う。
- 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：
 - ^{222}Rn の観測データベースを利用して、大陸の発生源の影響を強く受けた大気データを取り除き、広域の清浄大気を代表するデータを選別する手法の評価を行う。
 - CO_2 濃度の変動に対応する ^{222}Rn や O_2 濃度等の変動の関係性の解析を行い、組成比について、イベント・季節的な変動性の違いの有無について解析を実施する。
 - M5課題と連携し温室効果ガス輸送モデルを用いた ^{222}Rn 濃度の再現実験を行う。気象研究所で観

測を実施している4つの観測所における観測値との比較解析を行い、大陸からの気塊の輸送過程の再現性の評価を行う。

(副課題4)

- 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
 - 房総半島南東の黒潮再循環域において、令和2年4月～6月及び令和3年3月～5月にそれぞれ50日間程度の水中グライダー観測を行う。これらにより冬の深い鉛直混合の状態から夏への成層化と生物生産期における物理的・化学的な海洋鉛直構造の変化を把握する。
 - 前項の観測や筑波大学下田臨海実験センターにおける試験をもとに、水中グライダーの運行性能や観測性能などを確認し、効率的な観測法やデータ処理方法の開発を進める。
 - 使用する試薬の純度等が海水pH測定結果に及ぼす影響を評価する。
- ② データ解析による海洋物質循環の変動機構解明
 - 全炭酸濃度や全アルカリ度等の観測データに基づき、北太平洋表層の二酸化炭素など、生物地球化学パラメーターの長期変化の実態を明らかにする。
 - 海洋モデル及び地球システムモデルにより再現された現在気候条件における海洋生物地球化学場を観測結果と比較検討し、その再現性を検証する。

令和2年度の研究成果

成果の概要

(1) 課題全体

本研究は課題解決型研究課題であり、M 課題や本庁数値予報課、気候情報課、環境・海洋気象課などとの緊密な協力や、外部資金などを通じた他機関との共同研究を通じて、季節予報モデル、大気輸送モデル、温暖化予測モデル、地球システムモデルの解析や、長期再解析データの品質管理・解析、大気・海洋の温室効果ガスや種々の化学トレーサーの観測・解析、それらの組み合わせにより、異常気象のメカニズム、季節予測可能性、温暖化に関する種々の予測、大気・海洋の炭素循環や海洋酸性化などの実態と予測に関して、以下に述べる様々な成果を着実に挙げる事ができた。

(2) 副課題

(副課題1)

- ① アジアモンスーンと台風の予測可能性評価
 - 2010年夏の記録的な高温に対する大西洋の海水温の影響および2020年梅雨期の多雨に及ぼすインド洋の変動の影響について、現行季節予測システム(CPS2)を用いて研究を行い、異常気象発生メカニズムに関する論文(Takaya et al., 2020, Takaya et al., 2021)を発表した。
- ② 極端気象の実態と予測可能性の研究
 - 2019/2020年冬季の大暖冬について、異常気象発生や持続メカニズムに関する解析を行った。
 - ラージアンサンブルデータベースを利用して、日本の局所的な豪雨の発生確率の長期予測可能性を評価した。
- ③ 異常気象のメカニズム解明と要因に与える大規模場の影響評価
 - イベント・アトリビューションのためのデータベース延長実験を実施し、異常気象に備えた。
 - 平成29年7月九州北部豪雨および平成30年7月豪雨のイベント・アトリビューションに関する論文(Imada et al., 2020)を発表し、アウトリーチ活動を行った。
 - 令和元年台風19号(Kawase et al., 2020)、令和元年から令和2年にかけての大暖冬、令和2年7月豪雨に対する地球温暖化の影響の評価を行った。
 - 西日本の過去の大雨時と平成30年7月豪雨の循環場の特徴についてまとめた論文(Harada et al., 2020)を発表した。
 - EUパターンに関連する惑星波の変調を解析しEUパターンの力学的メカニズムを明らかにする論文(Maeda et al., 2021)を発表した。
 - 2019年南半球突然昇温後におきた南極振動の負位相の持続について、現行季節予測システム(CPS2)を用いた予測実験を実施し、実態解明と予測可能性の研究を行った。
 - 2019年南半球の成層圏突然昇温(SSW)発生時の特徴はダブルジェット構造をしており、循環場の特徴、波強制で駆動されるジェットの役割、対流圏ジェット変位の予測可能性を調べた。

- 夏季ユーラシア大陸で、亜熱帯ジェットと波強制で駆動されるジェットが発達するダブルジェット型について、循環場の特徴、運動量収支、生成・発達メカニズムを調べた。
- 国内気象官署の観測データを用いて過去 120 年間の梅雨期と秋雨期の降水量および大雨頻度の長期変動を調べ、梅雨期降水量は中期～末期（6/21～7/31）に日本海側中心に増加傾向の一方、秋雨期降水量は中期（9/21～10/10）に明瞭な減少傾向にあることが分かった。

④ 気候データに関する研究

- JRA-3Q ストリーム A の本計算では、各種衛星観測データセット（OA フラックス、CERES、TRMM および MLS/Aura など）を用いて熱・放射フラックスや降水量、非断熱加熱率の鉛直プロファイル、成層圏における水蒸気やオゾン分布などの品質評価を行った。またヨーロッパ中期予報センターや米国航空宇宙局などの他機関作成の最新プロダクト（ERA5、MERRA2 など）との比較を行った。
- JRA-3Q ストリーム B の本計算で、他期間の再解析を含む相互比較から、降水などの 2 次元平面量、風や気温の東西平均場、赤道準二年周期変動について評価を行った。
- 将来の再解析システムの検討に向け、気象研究所で開発された大気海洋結合同化システム（MRI-CDA1）を用いて、季節内スケールでの海面水温と降水の時間変化の関係の再現性に対する結合化のインパクトを示す研究を行い、論文（Kobayashi et al., 2021）として発表した。
- 利用可能な 20 種類の Level 2 衛星観測オゾン全量データを 40 年（1978-2017）分取得し、地上からのオゾン観測と比較から、2 種類の方法でバイアス補正と時間的に高分解能な結合データセットを作成し、論文として発表した（Naoe et al., 2020）。

（副課題 2）

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に外部条件を変えたアンサンブル生成スキームとデータ同化による初期値化スキームを組み入れた実験システム開発を行った。従来の大気モデルに比べ、季節内変動スケールの SST と降水の間のラグ相関が結合効果により改善することを確認した。通常の大気海洋結合モデルに比べると、同化により、降水量の気候値、年々変動が改善していることを確認した。
- 同システムで複数の CMIP6 モデル温暖化差分を加えた将来予測の予備実験を実施した。将来予測実験では CMIP6 に提出された海洋の温暖化に伴う変化を与えることで降水量の変化も再現できることを示し、海洋表層状況の分布の変化が降水量の分布の変化に強い影響を与えることが示唆された。
- 大気を高解像度化した予備実験を行った。大気海洋結合効果により、大気モデルに比べて強い台風の頻度の緯度分布が改善した。また高解像度化により梅雨の再現性能が向上した。
- 大気海洋結合モデルの高解像度化（大気 20 キロ、海洋 10 キロ）のテストを実施し、海水面温度、海面高度場、西岸境界流路の再現性が向上することを確認した。

② 十年規模気候変動予測

- 気象研地球システムモデル MRI-ESM2 により、CMIP6 のサテライト MIP である十年規模変動予測実験（DCPP）について、昨年度実施した実験では海洋の初期化に問題があったため、再実験を実施し、成功した。結果の解析に着手したほか、CMIP6 へのデータ提出作業を進めた。
- WMO の十年規模変動予測活動の一環として最新初期値による 予測実験を行い、実験結果をリードセンターである英国ハドレーセンターに提出した。

③ 気候再現実験

- 気候モデルに用いる、歴史的観測データの整備を進めた。

④ CMIP6 実験の実施と気候変動メカニズム解明

[CMIP6 実験の実施]

- CMIP6 サテライト MIP であるエアロゾルおよび大気化学に関するモデル相互比較計画 AerChemMIP 及び Covid-19 による人為起源排出量の減少が気候に及ぼす影響を評価するモデル相互比較計画 CovidMIP の実験を MRI-ESM2.0 を用いて実行した。これらの実験結果を共同で解析し、その成果を幾つかの論文として発表した（Zanis et al. (2000), Thornhill et al. (2020), Morgenstern et al. (2020), Skeie et al. (2020)）。また、放射強制力モデル相互比較計画 RFMIP と AerChemMIP の枠組みで、MRI-ESM2 での産業革命前を基準とした現在における人為起源気体

とエアロゾルによる有効放射強制力を MRI-ESM2.0 を用いて推定した (Oshima et al. (2000))。その他、国内外の研究者と協力して論文を発表した (Allen et al (2020), Tumock et al. (2020), Moseid et al. (2020))。

- 気候変動の検出と要因分析に関するモデル相互比較計画 DAMIP に参加し、MRI-ESM2.0 によるモデル計算を実施した。予測の不確実性を小さくするため、CMIP6 実験の historical、シナリオ MIP などの追加実験を行った。

[マルチモデルデータ解析を用いた気候メカニズム解明]

- MRI-AGCM3.2 による将来気候アンサンブル予測において、梅雨降水帯の 6 月は強化・南偏が高い確度で予測される一方、7 月は予測の不確実性が大きいことを示した。モデル感度実験により、要因の複雑さが影響することが分かった。
- CMIP5 マルチモデルアンサンブルおよび MRI-AGCM による大気循環予測実験結果について日本周辺の解析を行い、予測結果の説明と信頼度についての評価し、「冬季は暖冬型、夏季は初夏型の気圧配置、春季は北日本にアリューシャン低気圧が残る一方、秋季はアリューシャン低気圧の南下が遅れる季節変化の傾向が見られる」こと等がわかった (Ito et al. (2000))。
- CMIP5 マルチモデル間の降水量予測の不確実性について大気循環の将来変化による説明を行い、モデルの現在気候再現性や将来の海陸温度コントラストに基づく要因分析等を進めたところ、「地球温暖化時に生じる鉛直流の抑制は、現在気候における鉛直流 (すなわち降水量) 分布を反映しているため、現在気候のアジア太平洋モンスーンの降水量が比較的少ない (多い) モデルは、将来の夏季東アジア南風指数増加 (減少) を予測する傾向を示す」ことがわかった (Ose et al. (2020))。
- 下層雲の再現性が高い MRI-ESM2 を用いて、下層雲を取り除く数値実験により、従来言われていた、亜熱帯の下層雲の雲頂冷却が亜熱帯の太平洋高気圧を強化しているというメカニズムは少なくともこのモデルでは起こっていないことを明らかにした (Kawai et al. (2020))。
- 気候モデルにおける雲の取り扱いにかかわる、その値自体の不確実性も、結果に与える影響も大きいパラメーター「雲-降水変換が起こる雲粒有効半径の閾値 R_c 」が全球平均気温上昇の再現性に与える影響を、MRI-CGCM3 を用いて調べた。先行研究を支持する結果を得た上で、主に雲粒数密度の差がもたらす雲放射効果の差が効くことを明らかにした (Koshiro et al. (2020))。
- 国内外の研究者と共同研究を行い、その成果として、インド-西太平洋コンデンサー効果について、メカニズムおよび影響についてのレビュー論文を執筆した (Kosaka et al. (2020))。
- 庁内の研究者と共同研究を行い、負 A0 相は渦・帯状流フィードバックによりユーラシア・北米の寒冷を引き起こすことを示した (Minami et al. (2020))。
- d4PDF の解析により、降水の極端現象の地球温暖化による変化 (Mizuta et al. (2020))、東アジアの雨季の降水の地球温暖化による変化 (Kusunoki et al. (2021)) に関する論文を発表した。
- CMIP マルチモデルの結果から、降水の Tipping point にかかわる研究の論文を発表した (Kusunoki et al. (2020))。
- MRI-ESM2 による将来の全球の降水効率 (地上気温 1 度昇温当たりの降水量の変化) を、排出シナリオ別に、それぞれ平均量と極端降水に分けて調べた。平均降水量では低排出シナリオの方が降水効率が高く、排出シナリオをたとえば ssp585 に固定すると平均降水量よりも極端降水の方が降水効率が高いという結果を得た。

[気候変動評価レポート 2020]

- 国・地方公共団体、事業者、国民、さらには研究者向けの、地球温暖化に対する緩和策・適応策や影響評価の基盤情報として使える報告書として「日本の気候変動 2020」が気象庁と文部科学省の共同で 2020 年末に刊行されたが、気象研の他課題、気象庁等とも連携して貢献した。地球温暖化予測の最新の知見がまとめられており、「不確実性・確信度」の情報も記載されている。

(副課題 3)

① 化学トレーサーの時空間変動に関する観測研究

- 綾里・与那国島・南鳥島・父島の大気観測所におけるラドン (^{222}Rn) と水素等の微量気体の観測、南鳥島のハロカーボン観測、綾里の酸素濃度連続観測をそれぞれ継続した。父島では 4 月 22 日から CO_2/CH_4 計不具合のため欠測が続いたが、2 月点検時に対応し観測を再開した。

- 気象庁と標準ガス比較実験を年2回実施し、これまでの実験結果も踏まえながら、気象庁から要請のあるCO₂標準ガス新校正装置の性能評価や運用について技術支援を行った。
 - 南鳥島で開始された気象庁ハロカーボン観測について、技術支援を行った。これまで気象研が整備した標準ガスと気象庁が整備する標準ガスの比較実験を行い、観測スケールの維持手法について検討した。
 - 実大気標準ガス充填設備については現在のところ進捗はない。
- 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
- 新たに整備したラドンデータを用いて、大陸やローカルな発生源の直接的影響を受けた温室効果ガス濃度データの選別を行った。
 - ラドン、六フッ化水素 (SF₆)、人工トレーサーを用いて、気象庁二酸化炭素輸送モデル GSAM-TM の低・高解像度での再現実験を行い、南北半球間輸送がやや遅めの傾向を示す等の大規模輸送特性等について M5 担当者および環境・海洋気象課と共有した。
 - ERA5 の海洋熱フラックスデータ等を用いて作成したフラックスデータにより改善した Ar/N₂ 比の季節変動の GSAM-TM シミュレーション結果について JpGU ポスターおよび AGU Fall Meeting 2020 招待講演にて発表した。
 - 航空機観測データの解析から 2020 年の米国西部における大規模森林火災による CO₂ 放出とみられる濃度変動シグナルを見出すことができた。
 - 地球システムモデル MRI-ESM2.0 による CMIP6 歴史実験 (esm-hist) における大気二酸化炭素濃度の再現性を WMO/GAW WDCGG 地上観測データおよび他機関による解析データセットとの比較評価を行い、日本気象学会 2020 年度秋季大会で発表した。

(副課題 4)

- 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
- 晩冬から春季における海洋の遷移状況を確認するため、令和 2 年 3 月から 4 月にかけて房総半島沖合の黒潮再循環域において水中グライダー観測実施し、春季の成層化による生物生産の活発化を捉えることができた。晩冬の混合層最発達期を含めた季節遷移を完全に把握するにはもう少し早期に観測を開始し、黒潮続流にも近づく必要があることが分かったが、この時期特有の強風による高波の状況下でも問題なく水中グライダー観測を実施することができ、観測船による現場観測を補う手段となる可能性があることを確認した。
 - 水中グライダーの測器試験を筑波大学臨海実験センターで実施し、自己推進装置の操作習熟を行った。自己推進装置は想定通りに動作し、黒潮等海水の性質が急激に変化する海域での観測や低気圧の予想進路を想定した機動的観測など、今後の観測に柔軟性を持たせることができることを確認した。
 - pH 測定における色素溶液の時間変化の影響調査に関して、未精製・精製済の指示薬により、標準溶液 (CRM) の測定・比較を行い、それぞれの指示薬に対して提案されている補正手法の妥当性を評価した。補正のための測定は、同じ指示薬を使っている限り 1 週間に 1 度程度で十分ということを確認した。
 - アルカリ度に関して、実測値と pCO₂ 及び DIC の実測値から算出した推算値がよく一致し、十年規模で同様のトレンドを得ることができ、今後クロスチェック等による品質管理に役立つ可能性が示唆された。
- ② データ解析による海洋物質循環の変動機構解明
- 「日本の気候変動 2020」の「第 15 章 海洋酸性化」における将来変化の部分を分担し、CMIP5 地球システムモデルの結果や観測に基づく線形重回帰モデルを活用して、世界及び日本南方の海洋酸性化、炭酸カルシウム (アラゴナイト) 飽和度の低下に関する定量的評価を行った。
 - 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。
 - 太平洋西部赤道域の温度躍層とその下部を対象として、全炭酸濃度の鉛直勾配が大きな水深付近におけるその長期増加速度を評価する方法を考案した。その結果などに基づいて、同海域における海洋 CO₂ 増加・海洋酸性化のトレンドとその海洋循環との関係を考察した論文を発表した (Ishii et al. 2020)。

- 日本海の水深 200m 付近の低塩分層である日本海中層水について観測された 2009-2016 年にかけて低塩分化についてその起源を特定するために、北方からの水と南方からの水でリン酸塩の濃度が違うことを利用した結果、日本海中層水のリン酸塩濃度は低くなっており、今回のケースでは東シナ海からの水が増えたのが原因であることが分かった (Kosugi et al. 2020)。
- 筑波大学により伊豆半島下田沖において約 2 年間にわたってサンプリングされた海水に対する全炭酸と全アルカリ度の高精度測定に協力し、希少な本州南岸沿岸での炭酸系の通年観測例に基づく、同海域における炭酸系の季節変動とその要因の解明に貢献した (Wada et al., 2020)。
- 気象研究所地球システムモデル (MRI-ESM2) による CMIP6 の炭素循環相互比較プロジェクトの実験指針に準拠した実験結果を解析した結果、MRI-ESM2 では海洋による人為起源 CO₂ の吸収量は観測に基づく推測の不確実性に範囲にあるのに対し、陸域生態系による人為起源 CO₂ の吸収が観測に基づく推測より多いことが分かった。

計画に対する進捗度及び変更点

(1) 当初計画に対する進捗度 (計画した線表通りに研究が進捗しているかを記述)

どの課題も、概ね線表の計画通り研究が進捗した。(副課題 3) では CO₂CH₄ 計不具合による欠測が続いた。

(2) 当初計画から変更した点 (研究手法の変更点など)

- (副課題 1) 及び (副課題 3) は当初計画からの変更はない。
- (副課題 2) では当初「CMIP 実験」としていたテーマを、「CMIP 実験の実施と気候変動メカニズム解明」に拡張して進めている。
- (副課題 4) 令和 3 年 3 月に開始を予定していた水中グライダー観測は、開始直前に発生した測器の不具合により中止した。同季節・同領域での観測は令和 2 年 3 月から 4 月にかけて実施・成功しており、研究の進捗に対し大きくは影響しないものと想定している。なお、測器の不具合の原因を特定し再発防止措置を講じた。

本課題の成果から施策や他の研究への波及状況

(外部機関や所内外の研究課題への波及効果)

(副課題 1)

- 季節予測システム (JMA/MRI-CPS2) を用いた予測可能性の研究は、M4 課題と協力して進めている。2020 年の活発な梅雨・メイユの予測可能性に関する研究成果 (Takaya et al., 2020) などの予測可能性に関する調査研究は異常天候に関する気象庁の情報発信に寄与した。これらの研究成果は、今後の季節予測システム開発において、性能評価の着眼点としてフィードバックを与えたと考えられる。
- 本庁による次世代再解析 (JRA-3Q) ストリーム A、B の本計算について、各種衛星データや他気象機関作成再解析プロダクトを用いた品質評価および循環場全般の表現性能評価を行い、長期再解析推進懇談会資料を作成した。
- 地球温暖化と個別の異常気象の因果関係を評価するイベント・アトリビューションの研究を行い、社会的に影響の大きかった平成 30 年 7 月豪雨および同年夏の猛暑の異常気象についてその研究成果を報道発表し、アウトリーチ活動を行った。これらの成果は、共同研究「気候モデルを用いた気候変動再現実験のマルチモデル比較」(東京大学) や、外部研究「統合的気候変動予測」(文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム) におけるアウトリーチ活動にも貢献した。

(副課題 2)

- 気象庁と文部科学省の共同で刊行した『気候変動評価レポート 2020』の作成にあたり、気象庁気候変動対策推進室のとりまとめのもと、所内関係課題とも連携して協力した。

(副課題 3)

- 気象研究所で実施してきた南鳥島採取大気中のハロカーボン分析手法を参考に、南鳥島で開始された気象庁ハロカーボン観測の技術支援を行った。これまで気象研が整備した標準ガスと気象庁が整備する標準ガスの比較実験を行い、観測スケールの維持手法について検討した。
- 「温室効果ガス標準化共同プログラム」を気象庁環境・海洋気象課と共同運営し、WMO/GAW の全

球大気監視校正センター（WCC）活動を支える標準スケールの維持・管理に貢献した。

（副課題 4）

- 地球システムモデル出力や回帰モデル等を用いて得られた海洋酸性化の将来見通しを、「日本の気候変動 2020」に反映させた。

他省庁予算及び共同研究等からの反映状況

（他省庁予算等研究課題から本課題への波及効果）

（1）他省庁予算

（副課題 1）

- 外部研究「統合的気候変動予測」（文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム）において、領域気候モデルを用いて全球大気モデルによる大規模アンサンブル実験の結果をダウンスケーリングする実験を実施している。本課題ではこのデータをイベント・アトリビューション研究に利用しており、今年度は、2018年夏の猛暑や豪雨事例に対して温暖化の寄与推定を実施した。

（副課題 2）

- 外部研究「統合的気候変動予測」（文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム）において、気象研究所地球システムモデルの活用として、地球システムモデルに外部条件を変えたアンサンブル生成スキームとデータ同化による初期値化スキームを組み入れた実験システム（高解像度全球大気モデルと、海洋水温・塩分を同化する全球海洋モデルとを結合したシステム）を開発しており、また同課題は d4PDF 等のデータセットを作成しているが、これらを活かして研究を進めている。

（副課題 3）

- 地球一括計上（環境省 地球環境保全試験研究費）「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」（H31 年度～R5 年度）で得られた、南鳥島と綾里での大気中ラドン濃度の連続観測と綾里での酸素濃度連続観測を継続し、得られた時系列データを気象庁定常観測データとあわせ、品質管理を行った。ラドンデータについては輸送モデルの評価にも活用した。南鳥島の二酸化炭素同位体分析計（レーザー分光法）の高精度化について、情報交換を行った。
- 地球一括計上（環境省 地球環境保全試験研究費）「民間航空機による温室効果ガスの 3 次元長期観測とデータ提供システムの構築」（H28 年度～R2 年度）で得られた民間航空機による温室効果ガス観測データの品質管理を行い、データセットを作成すると同時に、本課題での解析に活用した。

（副課題 4）

- 外部研究「統合的気候変動予測」（文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム）において、気象研究所が開発した海洋物質循環モデルを活用した将来の海洋環境変化情報の創出可能性の検討が行われており、試験的に実施した現在気候及び過去の気候変動再現実験における海洋生物地球化学場の検証を参加機関と共同で進めている。黒潮続流域などにおいて低次生態系の過去の変動の再現性が良好であることなどが明らかとなった。

（2）共同研究

（副課題 1）

- 共同研究「気候モデルを用いた気候変動再現実験のマルチモデル比較」（東京大学）において、全球大気モデルを用いた大規模アンサンブル実験の延長実験を実施し、データを整備した。本課題ではこのデータをイベント・アトリビューション研究に利用しており、今年度は、2019/2020 年冬季の大暖冬や近年の豪雨事例に対して温暖化の寄与推定を実施した。また、領域気候モデルを用いた疑似非温暖化実験を実施し温暖化の寄与推定を実施した。
- 共同研究「季節予報の社会実装に向けた 2019/2020 年大暖冬の要因解明」（つくば産学連携強化プロジェクト（筑波大学 合わせ技ファンド））において、2019/20 年の大暖冬の要因解明のための解析を行った。

(副課題 3)

- 民間航空機を用いた温室効果ガス観測に関する研究：詳細は（1）地球一括計上（民間航空機）に記述のとおりである。
- 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）：南鳥島で採取した大気試料のハロカーボン分析を継続した。
- 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）：スカイツリーにて、ラドン観測を継続した。得られたデータを用いて、輸送モデルの評価を実施した。
- 南鳥島における二酸化炭素鉛直平均濃度観測（東京大学）：南鳥島の新太陽分光装置と従来型装置との並行観測を継続した。CO₂ カラム量濃度結果の評価後、気象庁の航空機観測データ等と比較解析を進める予定である。

(3) 公募型共同利用による研究**(副課題 1)**

- 京都大学防災研究所の短期滞在型共同研究課題「夏のダブルジェット力学変動と異常気象の実態解明」において、夏季ユーラシア大陸での循環場の特徴から擾乱で駆動されるジェットの運動量収支、生成・発達メカニズムを調べた。この課題の取組は、異常気象のメカニズム解明に貢献している。

(副課題 3)

- 文部科学省 北極域研究推進プロジェクト (ArCS) 事業北極気候変動分野 (国立極地研究所) 「北極域におけるメタン等温室効果気体の動態解明と収支評価」(H27 年度～R1 年度)：今年度羽田ーパリ路線の大気試料採取を 9 回実施し、高緯度上空の温室効果ガス濃度データを得た。他課題とも合わせた広範囲の航空機データセットを用い、解析等に活用した。

(4) 科学研究費補助金**(副課題 1)**

- 新学術（研究領域提案型）「対流圏成層圏結合が対流圏ジェット変動に及ぼす影響と中緯度海洋前線帯の役割」において、南半球成層圏突然昇温と対流圏ジェットとの関係から昇温時の循環場特徴を調べた。これらの成果は異常気象のメカニズム解明と季節予測の予測可能性に不確実性低減に資することが期待される。
- 新学術領域研究「中緯度域の気候変動のメカニズム解明と予測可能性」において、気象研の全球モデルと領域モデルによる大規模アンサンブル実験を用いた中緯度域の異常気象の長期予測可能性研究を実施しており、今年度は、日本の局所的な豪雨の発生確率の予測可能性を評価する研究を実施した。季節予測の予測可能性研究に直結する研究である。
- 基盤研究 (C) 「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」において、オゾン全量の Level 2 衛星観測データを地上からの観測と比較し結合データセットを作成した。このデータセットは、気象庁の次期長期再解析の境界条件としてのオゾン分布の基礎的データとなる。
- 基盤研究 (C) 「マルチモデル相互比較による事例別の季節予測可能性」において、過去のエルニーニョ事例について、気象研モデルを用いた季節予測結果と他機関の予測結果とを比較した。これらの取り組みは、季節予測の予測可能性研究においてモデル依存の不確実性の理解につながるものと期待される。
- 基盤研究 (A) 「等温位/等密度座標に基づく大気/海洋大循環の解析」において開発された循環場解析ツールを用いて、2019/20 年の大暖冬の解析や、2019 年南半球突然昇温後の負位相の南極振動の持続、EU パターン発現時の日本付近への寒気流入の解析を行い、異常気象分析に貢献している。

(副課題 3)

- 基盤 (B) 課題「拡散分離の定量評価により得られた大気組成の精密時空間変動に基づく温暖化影響の評価」(R1 年度～R3 年度)：南鳥島航空機観測で得られた上空の大気試料中の主成分（酸素、アルゴン）分析を行った。これらの結果も含め採取試料の温室効果ガスデータの品質評価を実施した。

今後の課題

(副課題 1)

- 令和5年度に第6回 WCRP 再解析国際会議を気象庁主催での開催を検討しており、開催が決定されれば本庁の担当部局と綿密な協力体制を構築し、実行計画を策定する必要がある。
- 異常気象の発生・変動メカニズムについては、引き続き予測可能性や長期変化を調査する必要がある。また、イベント・アトリビューション研究が将来的に気象庁の情報発信に貢献するために、過去の異常気象事例に遡った分析を行うことで情報の特性を精査する必要がある。

(副課題 2)

- 気象研究所地球システムモデルは気候再現特性に優れているが、令和2年度までに CMIP6 用に計算したアンサンブルメンバ数は多くはない。そこで、地球温暖化予測の不確実性の低減のため、令和3年度も追加実験を実施していく予定である。
- 本庁からの要望のある、十年規模変動に影響のある火山噴火に関する基礎調査のための実験も実施していく必要がある。

(副課題 3)

- 次世代観測技術の開発や地上観測点および航空機観測を推進・発展させるため研究技術の継承が課題である。
- 炭素収支解明に観測データと数値モデルを融合的に活用して温室効果ガスの変動と炭素収支の解析を進めるため、気象庁大気海洋部・情報基盤部及び所内他課題、および国内関係研究機関との連携をさらに進めることが必要である。

(副課題 4)

- 観測データと予測モデルデータを相互活用した研究の推進にあたっては、CMIP6 をはじめとする気象研究所以外のモデルセンターによる予測データの収集が不可欠である。ディスクスペースの確保やマルチモデル解析に資するデータの管理や解析ソフトウェアの整備が重要な課題である。

研究成果リスト

(1) 査読論文：48件

1. Tebaldi, C., and Coauthors, 2021: Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth System Dynamics*, **12**, 253–293.
2. Keeble et al., 2021: Evaluating stratospheric ozone and water vapor changes in CMIP6 models from 1850–2100. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **21**, 5015–5061.
3. Garfinkel et al., 2021: Influence of ENSO on entry stratospheric water vapor in coupled chemistry–ocean CCM1 and CMIP6 models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **21**, 3725–3740.
4. P. T. Griffiths, L. T. Murray, G. Zeng, Y. M. Shin, N. L. Abraham, A. T. Archibald, M. Deushi, L. K. Emmons, I. Galbally, B. Hassler, L. W. Horowitz, J. Keeble, J. Liu, O. Moeini, V. Naik, F. M. O’Conner, N. Oshima et al., 2021: Tropospheric ozone in CMIP6 Simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **21**, 4187–4218.
5. Takaya, Y., N. Saito, I. Ishikawa, S. Maeda, 2021: Two Tropical Routes for the Remote Influence of the Northern Tropical Atlantic on the Indo–western Pacific Summer Climate. *Journal of Climate*, **34**, 1619–1634.
6. Keen, A., E. Blockley, D. Bailey, J. B. Debernard, M. Bushuk, S. Delhayé, D. Docquier, D. Feltham, F. Massonnet, S. O’Farrell, L. Ponsoni, J. Rodriguez, D. Schroeder, N. Swart, T. Toyoda, H. Tsujino, M. Vancoppenolle, and K. Wyser, 2021: An inter-comparison of the mass budget of the Arctic sea ice in CMIP6 models. *The Cryosphere*, **15**, 951–982.

7. Yosuke Iida, Yusuke Takatani, Atsushi Kojima, Masao Ishii, 2021: Global trends of ocean CO₂ sink and ocean acidification: an observation-based reconstruction of surface ocean inorganic carbon variables. *Journal of Oceanography*, **77**, 323–358.
8. Fujii, Y., T. Ishibashi, T. Yasuda, Y. Takaya, C. Kobayashi, and I. Ishikawa, 2021: Improvements in tropical precipitation and sea surface air temperature fields in a coupled atmosphere-ocean data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **147**, 1317–1343.
9. Thornhill, G. D., W. J. Collins, R. J. Kramer, D. Olivié, R. B. Skeie, F. M. O’Connor, N. L. Abraham, R. Checa-Garcia, S. E. Bauer, M. Deushi, L. K. Emmons, P. M. Forster, L. W. Horowitz, B. Johnson, J. Keeble, J.-F. Lamarque, M. Michou, et al., 2021: Effective radiative forcing from emissions of reactive gases and aerosols - a multi-model comparison. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **21**, 853–874.
10. Kobayashi, C., Y. Fujii, I. Ishikawa, 2021: Intraseasonal SST-Precipitation Relationship in a coupled reanalysis experiment using the MRI coupled atmosphere-ocean data assimilation system. *Climate Dynamics*.
11. Rodgers, K. B., M. Ishii, T. L. Frölicher, S. Schlunegger, O. Aumont, K. Toyama, and R. D. Slater, 2020: Coupling of Surface Ocean Heat and Carbon Perturbations over the Subtropical Cells under Twenty-First Century Climate Change. *Journal of Climate*, **33**, 10321–10338.
12. Hasegawa, A., Y. Imada, H. Shiogama, M. Mori, H. Tatebe, M. Watanabe, 2020: Impact of air-sea coupling on the probability of occurrence of heat waves in Japan. *Progress in Earth and Planetary Science*, **7**, 78.
13. Naohiro Kosugi, Nariaki Hirose, Takahiro Toyoda and Masao Ishii, 2020: Rapid freshening of Japan Sea Intermediate Water in the 2010s. *Journal of Oceanography*, **76**.
14. Harada, Y., H. Endo, and K. Takemura, 2020: Characteristics of Large-Scale Atmospheric Fields during Heavy Rainfall Events in Western Japan: Comparison with an Extreme Event in Early July 2018. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **98**, 1207–1229.
15. Kusunoki, S., and R. Mizuta, 2020: Future changes in rainy season over East Asia projected by massive ensemble simulations with a high-resolution global atmospheric model. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **99**, 79–100.
16. Takaya, Y., I. Ishikawa, C. Kobayashi, H. Endo, and T. Ose, 2020: Enhanced Meiyu-Baiu Rainfall in Early Summer 2020: Aftermath of the 2019 Super IOD Event. *Geophysical Research Letters*.
17. Turnock, S. T., R. J. Allen, M. Andrews, S. E. Bauer, M. Deushi, L. Emmons, P. Good, L. Horowitz, J. G. John, M. Michou, P. Nabat, V. Naik, D. Neubauer, F. M. O’Connor, D. Olivié, N. Oshima, M. Schulz, A. Sellar, S. Shim, T. Takemura, S. Tilmes, et al., 2020: Historical and future changes in air pollutants from CMIP6 models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 14547–14579.
18. Niwa, Y., and Y. Fujii, 2020: A conjugate BFGS method for accurate estimation of a posterior error covariance matrix in a linear inverse problem. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146**, 3118–3143.
19. Hirabayashi, Y., A. Heireti, D. Yamazaki, G. Donchyts, Y. Kimura, Y. Imada, and H. Shiogama, 2020: Effect of anthropogenic climate change on recent flooding. *Geophysical Research Letters*. (submitted)

20. Stockdale, T. N., H. Naoe, K. Yoshida, S. Yukimoto et al., 2020: Prediction of the quasi - biennial oscillation with a multi - model ensemble of QBO - resolving models. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1-22.
21. Couldrey, MP, J. M. Gregory, S. M. Griffies, H. Haak, A. Hu, M. Ishii, J. Jungclaus, O. A. Saenko, A. Shao, T. Suzuki, A. Todd, L. Zanna, 2020: What causes the spread of model projections of ocean dynamic level change in response to greenhouse gas forcing? . *Climate Dynamics*.
22. Ito, R., T. Ose, H. Endo, R. Mizuta, K. Yoshida, A. Kitoh, T. Nakaegawa, 2020: Seasonal characteristics of future climate change over Japan and the associated atmospheric circulation anomalies in global model experiments. *Hydrological Research Letters*, **14**, 130-135.
23. 石井 正好、森 信人, 2020: d4PDF: large-ensemble and high-resolution climate simulations for global warming risk assessment.. *Progress in Earth and Planetary Science*, **7**.
24. Morgenstern et al., 2020: Reappraisal of the climate impacts of ozone - depleting substances. *Geophysical Research Letters*, **47**, e2020GL088295.
25. Urakawa, L. S., H. Tsujino, H. Nakano, K. Sakamoto, G. Yamanaka, and T. Toyoda, 2020: The sensitivity of a depth-coordinate model to diapycnal mixing induced by practical implementations of the isopycnal tracer diffusion scheme. *Ocean Modelling*, **154**, 101693.
26. Rodgers, K. B., S. Schlunegger, R. D. Slater, M. Ishii, T. L. Frölicher, K. Toyama, Y. Plancherel, O. Aumont, and A. J. Fassbender, 2020: Reemergence of Anthropogenic Carbon Into the Ocean's Mixed Layer Strongly Amplifies Transient Climate Sensitivity. *Geophysical Research Letters*, **47**, e2020GL089275.
27. Imada, Y., H. Kawase, M. Watanabe, H. Shiogama, M. Arai, and I. Takayabu, 2020: Advanced event attribution for heavy regional rainfall events.. *npj Climate and Atmospheric Science*, **3**, 35.
28. Robertson, F.R., J. B. Roberts1, M. G. Bosilovich, A. Bentamy, M. Schroeder, H. Tomita, C. A. Clayson, G. P. Compo, M. Gutenstein, C. Kobayashi, P. Sardeshmukh, L. C. Slivinski, 2020: Ocean Latent Heat Flux Uncertainties at Interannual to Inter-decadal Scales in Satellite Retrievals and Reduced Observation Reanalyses.. *Journal of Climate*.
29. Kazuto TAKEMURA, Hitoshi MUKOUGAWA, Shuhei MAEDA, 2020: Large-scale atmospheric circulation related to frequent Rossby wave breaking nearJapan in boreal summer. *Journal of Climate*, **33**, 6371-6744.
30. Yasunori Tohjima, Jiye Zeng, Tomoko Shirai, Yosuke Niwa, Shigeyuki Ishidoya, Fumikazu Taketani, Daisuke Sasano, Naohiro Kosugi, Sohiko Kameyama, Hisahiro Takashima, Hideki Nara, Shinji Morimoto, 2020: Estimation of CH4 emissions from the East Siberian Arctic Shelf based on atmospheric observations aboard the R/V Mirai during fall cruises from 2012 to 2017. *Polar Science*, **27**.
31. Tsujino, H., L. S. Urakawa, S. M. Griffies, G. Danabasoglu, 他 38 名, 2020: Evaluation of global ocean-sea-ice model simulations based on the experimental protocols of the Ocean Model Intercomparison Project phase 2 (OMIP-2). *Geoscientific Model Development*, **13**, 3643-3708.
32. Skeie et al. , 2020: Historical total ozone radiative forcing derived from CMIP6 simulations. *npj Climate and Atmospheric Science*, **3**, 32.
33. Zanis, P., Akritidis, D., Georgoulis, A. K., Allen, R. J., Bauer, S. E., Boucher, O., Cole, J., Johnson, B., Deushi, M., Michou, M., Mulcahy, J., Nabat, P., Olivie, D., Oshima, N., Sima, A., Schulz, M., Takemura, T., and Tsigaridis, K.,

- 2020: Fast responses on pre-industrial climate from present-day aerosols in a CMIP6 multi-model study. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 8381–8404.
34. Noguchi, S., Y. Kuroda, K. Kodera, and S. Watanabe, 2020: Robust enhancement of tropical convective activity by the 2019 Antarctic sudden stratospheric warming. *Geophysical Research Letters*, **47**, e2020GL088743.
35. Kwiatkowski, L., O. Torres, L. Bopp, K. Toyama, H. Tsujino, 他 23 名 , 2020: Twenty-first century ocean warming, acidification, deoxygenation, and upper-ocean nutrient and primary production decline from CMIP6 model projections. *Biogeosciences*, **17**, 3439–3470.
36. Masao Ishii, Keith B. Rodgers, Hisayuki Y. Inoue, Katsuya Toyama, Daisuke Sasano, Naohiro Kosugi, Hisashi Ono, Kazutaka Enyo, Toshiya Nakano, Daniele Iudicone, Bruno Blanke, Olivier Aumont, and Richard A. Feely, 2020: Ocean Acidification From Below in the Tropical Pacific. *Global Biogeochemical Cycles*, **34**, e2019GB006368.
37. Mizuta, R., and H. Endo, 2020: Projected changes in extreme precipitation in a 60-km AGCM large ensemble and their dependence on return periods. *Geophysical Research Letters*, **47**, e2019GL086855.
38. Roberts, M. J., J. Camp, J. Seddon, P. L. Vidale, K. Hodges, B. Vannière, J. Mecking, R. Haarsma, A. Bellucci, E. Scoccimarro, L.-P. Caron, F. Chauvin, L. Terray, S. Valcke, M.-P. Moine, D. Putrasahan, C. D. Roberts, R. Senan, C. Zarzycki, P. Ullrich, Y. , 2020: Projected future changes in tropical cyclones using the CMIP6 HighResMIP multimodel ensemble. *Geophysical Research Letters*, **47**, e2020GL088662.
39. Holt, L. A., H. Naoe, K. Yoshida, S. Yukimoto et al., 2020: An evaluation of tropical waves and wave forcing of the QBO in the QBOi models. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1–27.
40. Sugi, M., Y. Yamada, K. Yoshida, R. Mizuta, M. Nakano, C. Kodama, M. Satoh, 2020: Future changes in the global frequency of tropical cyclone seeds. *SOLA*, **16**, 70–74.
41. Takegawa, N., T. Seto, N. Moteki, M. Koike, N. Oshima, K. Adachi, K. Kita, A. Takami, and Y. Kondo, 2020: Enhanced new particle formation above the marine boundary layer over the Yellow Sea: Potential impacts on cloud condensation nuclei. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*.
42. Cha, E. J., T. R. Knutson, T. C. Lee, M. Ying, and T. Nakaegawa, 2020: Third Assessment on Impacts of Climate Change on Tropical Cyclones in the Typhoon Committee Region - Part II: Future Projections. *Tropical Cyclone Research and Review*, **9**, 75–86.
43. Minami, A. and Y. Takaya, 2020: Enhanced Northern Hemisphere correlation skill of subseasonal predictions in the strong negative phase of the Arctic Oscillation. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*.
44. Notz, D., J. Dorr, D. A. Bailey, E. Blockley, M. Bushuk, J. B. Debernard, E. Dekker, P. DeRepentigny, D. Docquier, N. S. Fuckar, J. C. Fyfe, A. Jahn, M. Holland, E. Hunke, D. Iovino, N. Khosravi, F. Massonnet, G. Madec, S. O'Farrell, A. Petty, et al., 2020: Arctic Sea Ice in CMIP6. *Geophysical Research Letters*, **47**, e2019GL086749.
45. Ishidoya A., H. Sugawara, Y. Terao, N. Kaneyasu, N. Aoki, K. Tsuboi, and H. Kondo, 2020: O₂: CO₂ exchange ratio for net turbulent flux observed in an urban area of Tokyo, Japan, and its application to an evaluation of anthropogenic CO₂ emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 5293–5308.

46. Naoe, H., T. Matsumoto, K. Ueno, T. Maki, M. Deushi, and A. Takeuchi, 2020: Bias correction of multi-sensor total column ozone satellite data for 1978–2017. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **98**, 353–377.
47. Endo, H., A. Kitoh, R. Mizuta, and T. Ose, 2021: Different future changes between early and late summer monsoon precipitation in East Asia. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. (submitted)
48. Shigeyuki Ishidoya, Satoshi Sugawara, Yasunori Tohjima, Daisuke Goto, Kentaro Ishijima, Yosuke Niwa, Nobuyuki Aoki, and Shohei Murayama, 2021: Secular change in atmospheric Ar/N₂ and its implications for ocean heat uptake and Brewer–Dobson circulation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **21**, 1357.

(2) 査読論文以外の著作物（翻訳、著書、解説）：13件

1. Fudeyasu, H., K. Yoshida, and R. Yoshida, 2020: Future Changes in Western North Pacific Tropical Cyclone Genesis Environment in High-Resolution Large-Ensemble Simulations. *Oceans*, **1**, 355–368.
2. Kosaka, Y., Y. Takaya, Y. Kamae, 2020: The Indo-western Pacific Ocean capacitor effect. *Tropical and Extratropical AirSea Interactions Modes of Climate Variations*, 141–162.
3. S  ferian, R., S. Berthet, A. Yool, J. Palmi  ri, L. Bopp, A. Tagliabue, L. Kwiatkowski, H. Nakano, H. Tsujino, 他 19 名, 2020: Tracking improvement in simulated marine biogeochemistry between CMIP5 and CMIP6. *Current Climate Change Reports*, **6**, 95–119.
4. Saito, K., K. Watanabe, S. Haginoya, K. Takeda, T. Sueyoshi, T. Hirota, M. Mizoguchi, K. Harada, H. Hosaka, M. Kimura, H. Yabuki, 2020: Database for ground temperature and freezing depth in Japan. *Polar Data Journal*, **4**, 83–96.
5. Koshiro, T., H. Kawai, and S. Yukimoto, 2020: Impact of cloud microphysics parameter on 20th century warming simulated in MRI–CGCM3. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Earth System Modelling*, **50**, 713–714.
6. Kawai, H., and T. Koshiro, 2020: Does Radiative Cooling of Stratocumulus Strengthen Summertime Subtropical Highs?. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Earth System Modelling/WMO*, **50**, 711–712.
7. Kawai, H., T. Koshiro, and S. Yukimoto, 2020: Relationship between shortwave radiation bias over the Southern Ocean and the ITCZ in MRI–ESM2. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Earth System Modelling/WMO*, **50**, 709–710.
8. Zhang, G., H. Murakami, T. R. Knutson, R. Mizuta, and K. Yoshida, 2020: Tropical cyclone motion in a changing climate. *Science Advances*, **6**, eaaz7610.
9. Kitoh, A. and H. Endo, 2021: Future changes in global monsoon precipitation and their uncertainty: Results from 20-km and 60-km MRI–AGCM Ensemble Simulations. *The Multiscale Global Monsoon System*, 343–353.
10. 今田由紀子, 川瀬宏明, 渡部雅浩, 2020: 2018年夏のイベント・アトリビューション. *気象研究ノート*. (submitted)
11. 村松貴有, 加藤輝之, 中里真久, 遠藤洋和, 鬼頭昭雄, 2020: 竜巻の将来予測. *気象研究ノート*, **243**, 288–297.
12. 植田宏昭, 前田修平, 谷本陽一, 立花義裕, 2020: 2019年秋季「気候形成・変動機構研究連絡会」の報告. *天気*, **67**, 51–53.
13. 石井雅男, 2020: 海洋酸性化の現状と影響 — 二酸化炭素排出によるもうひとつの地球環境問題. *EIC ピックアップ*, **278**.

(3) 学会等発表 : 59 件

1. Kosaka, Y., Y. Takaya, M. Watanabe, S. Maeda, The Pacific-Indian Ocean coupling and seasonal prediction of the Asian summer climate, WCRP-CLIVAR Workshop on Climate Interactions among the Tropical Basins, 2021年2月, オンライン
2. Takaya, Y., N. Saito, I. Ishikawa, S. Maeda, Two Tropical Routes for the Remote Influence of the Northern Tropical Atlantic on the Indo-western Pacific Summer Climate, WCRP-CLIVAR Workshop on Climate Interactions among the Tropical Basins, 2021年2月, オンライン
3. 直江寛明, 榎本剛, 今田由紀子, Dynamical variability of the double-jet structure in the Northern Hemisphere summer, 令和2年度京都大学防災研究所研究発表講演会, 2021年2月, 京都府宇治市
4. 今田由紀子, Potential Predictability of Extremes Estimated by Large Ensemble Simulations, AGU Fall Meeting 2020, 2020年12月, 米国, virtual
5. Harada Y., S. Kobayashi, Y. Kosaka, J. Chiba, K. Kamiguchi, and T. Tokuyoshi, Early results of the evaluation of the JRA-3Q Reanalysis, AGU Fall Meeting 2020, 2020年12月, 米国, virtual
6. Kobayashi, C., and I. Ishikawa, Prolonged Northern-Mid-Latitude Tropospheric Warming in 2018 Well Predicted by the JMA Operational Seasonal Prediction System, AGU Fall Meeting 2020, 2020年12月, 米国, virtual
7. Takaya, Y., N. Saito, I. Ishikawa, S. Maeda, Y. Kosaka, M. Watanabe, Rethinking the ENSO-monsoon relationship in light of trans-basin interactions, 2020 AGU Fall Meeting, 2020年12月, アメリカ, サンフランシスコ
8. Naoe, H., T. Hirooka, C. Kobayashi, Y. Harada, Y. Imada, and S. Maeda, Wave Guide of the 2019 Stratospheric Sudden Warming and Tropospheric Double Jets in the Southern Hemisphere, AGU Fall Meeting 2020, 2020年12月, 米国, virtual
9. Fujii, Y., C. Kobayashi, I. Ishikawa, Y. Takaya, and T. Ishibashi, Evaluation of the lead-lag relationship between SST and precipitation in a coupled reanalysis using TAO-TRITON data, 2020 AGU Fall Meeting, 2020年12月, アメリカ, サンフランシスコ
10. 藤田遼, 森本真司, 町田敏伸, 澤庸介, 松枝秀和, 坪井一寛, 青木周司, 中澤高清, Carbon and hydrogen isotope ratios of methane in the upper troposphere/lowermost stratosphere over the Eurasian Continent, 「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, 2020年12月, (オンライン)
11. Shigeyuki Ishidoya, Satoshi Sugawara, Shinji Morimoto, Daisuke Goto, Yasunori Tohjima, Kentaro Ishijima, Dmitry Belikov, Fumio Hasebe, Kazuhiro Tsuboi, Shohei Murayama, Nobuyuki Aoki, Shuji Aoki, Takakiyo Nakazawa, Observations of elemental and isotopic ratios of atmospheric major components and its application to detect atmospheric circulation and ocean heat uptake changes, 2020 AGU Fall Meeting, 2020年12月, アメリカ, サンフランシスコ
12. Inai, Y., S. Chida, S. Morimoto, S. Murayama, S. Aoki, T. Nakazawa, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, K. Tsuboi, K. Katsumata, R. Fujita, Seasonal variations of $\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C$ of CO₂ in the upper troposphere and lower stratosphere over Siberia, 第11回極域科学シンポジウム, 2020年11月, 東京都
13. Ryo Fujita, Heather Graven, Impact of atmospheric radiocarbon and stable isotope measurements on understanding the global CH₄ budget over 1750-2015, 第25回大気化学討論会, 2020年11月, (オンライン)
14. Imada, Y., H. Kawase, H. Shiogama, M. Mori, C. Takahashi, M. Arai, M. Watanabe, and I. Takayabu, Event attribution using large ensemble model simulations by MIROC5,

- MRI-AGCM, and NHRCM, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
15. Mizuta, R. and H. Endo, Projected changes in extreme precipitation in a 60-km AGCM large ensemble and their dependence on return periods, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
 16. Ganeshi, N., M. Mujumdar, R. Krishnan, M. Goswami, Y. Takaya and T. Terao, Understanding the impact of soil moisture variations on temperature extremes over the Indian region, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
 17. Takaya, Y., Y. Kosaka, M. Watanabe, S. Maeda, N. Saito, I. Ishikawa, Rethinking the ENSO-monsoon relationship in light of trans-basin interactions, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
 18. 石戸谷重之、石島健太郎、菅原敏、丹羽洋介、遠嶋康徳、後藤大輔、坪井一寛、村山昌平、青木伸行、眞木貴史、田中泰宙、中村貴, Seasonal variations in the atmospheric Ar/N₂ ratio observed at ground-based stations in Japan and Antarctica and its application to an evaluation of the air-sea heat flux, JpGU meeting 2020, 2020年7月, 千葉県千葉市
 19. Kobayashi, C. and S. Maeda, Persisted negative Antarctic oscillations after sudden stratospheric warming in the Southern Hemisphere in 2019, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
 20. Masao Ishii, Sustainable ocean carbon and biogeochemistry observing system in the era of warming, acidification and deoxygenation, 日本地球惑星科学連合 2020年大会, 2020年7月, 千葉県千葉市幕張
 21. Taichu Y Tanaka, Johannes Flemming, Alexander Baklanov, Greg Carmichael, James H. Crawford, Vincent-Henri Peuch, Guy Brasseur, Ranjeet Sokji, Sean Khan, Slobodan Nickovic, Xiao-ye Zhang, Christopher Gan, Kobus Pienaar, Nathalie Laure Roebbel, Radenko Pav, Towards a globally harmonized air quality forecasting: GAFIS, a new WMO-GAW initiative, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
 22. Taichu Y Tanaka, Keiya Yumimoto, Mayumi Yoshida, Hiroshi Murakami, Takashi M. Nagao, Megumi Okata, Aerosol data assimilation experiment using GCOM-C SGLI aerosol product, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
 23. 吉田康平, Do sudden stratospheric warmings boost convective activity in the tropics?, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
 24. Yayoi Harada, Relationship between the Boreal Summer Intra-seasonal Oscillation and the Stratospheric Quasi-Biennial Oscillation, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, 千葉市幕張
 25. Imada, Y., H. Tatebe, M. Ishii, Y. Chikamoto, M. Mori, M. Arai, S. Kanae, M. Watanabe, and M. Kimoto, Predictability of two flavors of El Nino and statistical downscaling by SVD analysis using the MIROC5 seasonal prediction system, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
 26. Rodgers, K. B., P. Zhai, R. D. Slater, B. R. Carter, D. Iudicone, O. Aumont, J. Farmer, I. Frenger, Y. Plancherel, L. Resplandy, A. Fassbender, and K. Toyama, Western boundary currents and their extension regions as conduits for the ejection of bomb-radiocarbon from the thermocline, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
 27. Tsujino, H., A. Obata, S. Yukimoto, M. Hosaka, T. Tanaka, K. Toyama, T. Koshiro, S. Urakawa, H. Nakano, Evaluation of carbon cycles in a suite of CMIP6-C4MIP

- experiments by Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0 (MRI-ESM2.0), JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, 千葉県千葉市
28. Kawai, H., and T. Koshiro, Stability Index for Marine Low Cloud Cover over the Mid-latitudes, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
 29. 直江寛明, 小林ちあき, 原田やよい, 対流圏成層圏結合が対流圏ジェット変動に及ぼす影響と中緯度海洋前線帯の役割(その2), 新学術領域研究「中緯度大気海洋」(気候系のHotspot2)第2回領域全体会議(virtual会合), 2021年3月, 横浜
 30. 遠藤洋和, 梅雨と秋雨の過去120年間の長期変動, 研究会「長期予報と大気大循環」, 2021年1月, オンライン
 31. 今田由紀子, 川瀬宏明, 近年の日本の豪雨や高温事例に地球温暖化が与えた影響~d4PDFによるEvent Attribution研究の進展, 令和2年度日本気象学会長期予報研究連絡会, 2021年1月, オンライン
 32. 今田由紀子, 2019/2020年の大暖冬のイベント・アトリビューション, 第16回「異常気象と長期変動」(異常気象研究会), 2020年12月, 京都府宇治市
 33. 原田やよい, 遠藤洋和, 竹村和人, 令和2年7月豪雨時における大気循環場の特徴と過去の大気雨事例との比較, 第16回「異常気象と長期変動」(異常気象研究会), 2020年12月, 京都府宇治市
 34. 小林ちあき, 前田修平, 2019年南半球成層圏突然昇温後の対流圏における負の南極振動, 第16回「異常気象と長期変動」(異常気象研究会), 2020年12月, 京都府宇治市
 35. 直江寛明, 榎本剛, 今田由紀子, 夏季のダブルジェットの力学変動, 第16回「異常気象と長期変動」(異常気象研究会), 2020年12月, 京都府宇治市
 36. 辻野博之, 小室芳樹, 浦川昇吾, 海洋モデル相互比較プロジェクトと日本からの貢献, 日本海洋学会2020年度秋季大会, 2020年11月, オンライン
 37. 小野 恒, 石井雅男, 飯田洋介, 延与和敬, 笹野大輔, 西部北太平洋亜寒帯域における表面海水中全炭酸濃度の増加傾向, 日本海洋学会2020年度秋季大会, 2020年11月, オンライン
 38. 小杉如央, 小野恒, 延与和敬, 石井雅男, 気象庁観測船による2010年代の北西太平洋亜熱帯域における全アルカリ度観測結果, 日本海洋学会2020年度秋季大会, 2020年11月, オンライン
 39. 石戸谷重之, 遠嶋康徳, 石島健太郎, 菅原敏, 丹羽洋介, 後藤大輔, 村山昌平, 坪井一寛, 青木伸行, 中村貴, 大気中アルゴン・窒素比を用いた大気ポテンシャル酸素の変動要因の評価一季節変動と緯度分布一, 第25回大気化学討論会, 2020年11月, 千葉
 40. 石島健太郎, 坪井一寛, 松枝秀和, 田中泰宙, 眞木貴史, 中村貴, 丹羽洋介, 日本周辺における大気中ラドン濃度の短周期変動, 第25回大気化学討論会, 2020年11月, 千葉
 41. 小林ちあき, 前田修平, 2019年南半球成層圏突然昇温後の負の南極振動の持続(その2), 日本気象学会2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 42. 直江寛明, 小林ちあき, 原田やよい, 今田由紀子, 前田修平, 廣岡俊彦, 2019年南半球SSWの波動伝播特性とダブルジェット, 日本気象学会2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 43. 田中泰宙, 辻野博之, 足立恭将, 小畑淳, 中野英之, 保坂征宏, 神代剛, 行本誠史, 地球システムモデルによるCMIP6実験での大気CO₂分布再現性の評価, 日本気象学会2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 44. 原田やよい, 遠藤洋和, 竹村和人, 西日本の大雨時における大気大循環場の特徴~平成30年7月豪雨との比較~(第2報), 日本気象学会2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン

45. 川合秀明, 神代剛, 亜熱帯下層雲の放射冷却は夏季の亜熱帯高気圧を強化するか?, 日本気象学会 2020 年度秋季大会, 2020 年 10 月, オンライン
46. 今田由紀子, 川瀬宏明, 渡部雅浩, 荒井美紀, 塩竈秀夫, 高藪出, 地域的な豪雨イベントに対する発展的イベント・アトリビューション, 日本気象学会 2020 年度秋季大会, 2020 年 10 月, オンライン
47. 尾瀬智昭, 高谷祐平, 仲江川敏之, 前田修平, CMIP5 マルチモデル将来予測実験における夏季東アジアの気圧配置および南風モンスーンの分析, 日本気象学会 2020 年度秋季大会, 2020 年 10 月, オンライン
48. 川合秀明, 神代剛, 遠藤洋和, 荒川理, 全球の海霧の分布とその温暖化時の変化, 日本気象学会 2020 年度秋季大会, 2020 年 10 月, オンライン
49. 高谷祐平, 齊藤直彬, 石川一郎, ENSO-アジアモンスーン関係の再考, 日本気象学会 2020 年度秋季大会, 2020 年 10 月, オンライン
50. 直江寛明, 対流圏成層圏結合が対流圏ジェット変動に及ぼす影響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1回領域全体会議 (virtual 会合), 2020 年 9 月, 横浜
51. 今田由紀子, 2020 年梅雨前線豪雨の特徴と近年の異常気象について, 2020 年梅雨前線がもたらした中国・日本の大水害シンポジウム, 2020 年 8 月, オンライン
52. 小杉 如央, 広瀬 成章, 豊田 隆寛, 石井 雅男, 栄養塩をトレーサーとした日本海中層水に含まれる淡水起源の推定, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020 年 7 月, オンライン
53. Endo, H., A. Kitoh, R. Mizuta and T. Ose, Future changes in East Asian summer monsoon precipitation and their uncertainty in 60km-mesh MRI-AGCM ensemble simulations. JpGU-AGU Joint Meeting 2020, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, 2020 年 7 月, オンライン
54. 小野恒, 石井雅男, 谷崎知穂, 飯田洋介, 延与和敬, 笹野大輔, 東経 165 度線における表面海中全炭酸濃度の変動と東経 137 度線との比較, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020 年 7 月, オンライン
55. 尾瀬智昭, 遠藤洋和, 仲江川敏之, 日本域の季節平均気圧配置の将来変化, 日本気象学会 2020 年度春季大会, 2020 年 5 月, オンライン
56. 小林ちあき, 前田修平, 2019 年南半球成層圏突然昇温後の負の南極振動の持続, 日本気象学会 2020 年度春季大会, 2020 年 5 月, 川崎市
57. 遠藤洋和, 鬼頭昭雄, 水田亮, 尾瀬智昭, 高解像度 MRI-AGCM による東アジアの夏季降水量の将来変化と不確実性, 日本気象学会 2020 年度春季大会, 2020 年 5 月, オンライン
58. 小畑淳, 辻野博之, 将来温暖化時の旱魃、飢饉を地球システムモデルで探る, 日本気象学会 2020 年度春季大会, 2020 年 5 月, オンライン
59. 原田やよい, 遠藤洋和, 竹村和人, 西日本の大雨時における大気大循環場の特徴～平成 30 年 7 月豪雨との比較～ (第 2 報), 日本気象学会 2020 年度春季大会, 2020 年 5 月, オンライン

受賞・報道・アウトリーチ活動等 (報道)

- Y. Imada and M. Watanabe, The First Undeniable Climate Change Deaths. EOS, 20 August, 2020, https://eos.org/articles/the-first-undeniable-climate-change-deaths?utm_source=eos&utm_medium=email&utm_campaign=EosBuzz082120
- 今田由紀子, 猛暑のイベント・アトリビューション, NHK 総合「ニュースシブ 5 時」, 2020 年 8 月 25 日
- 今田由紀子, 「地球温暖化が近年の日本の豪雨に与えた影響を評価しました」報道発表内容, NHK 茨城「茨城ニュース 845」, 2020 年 10 月 20 日
- 今田由紀子, 「西日本豪雨と同規模の大雨、温暖化で発生確率 3.3 倍に」, 朝日デジタル, 2020

年 10 月 20 日

今田由紀子, 「温暖化で大雨の頻度 3.3 倍に 瀬戸内地域で、気象研分析」, 共同通信, 2020 年 10 月 20 日

今田由紀子, 「18 年西日本豪雨 温暖化で発生確率 3.3 倍 気象研などスパコンで分析」, 毎日新聞デジタル, 2020 年 10 月 20 日

今田由紀子, 「温暖化で大雨の頻度 3.3 倍に」, 西日本新聞, 2020 年 10 月 20 日

今田由紀子, 「温暖化で豪雨発生増 「西日本」級 確率 3 倍 気象研」, 日本農業新聞, 2020 年 10 月 21 日

今田由紀子, 「西日本豪雨 温暖化で確率 3.3 倍」, 毎日新聞朝刊, 2020 年 10 月 21 日

今田由紀子, 「18 年の西日本豪雨級 温暖化の影響で発生確率 3.3 倍に」, 日本経済新聞朝刊, 2020 年 10 月 21 日

今田由紀子, 「九州豪雨「温暖化で発生率 1.5 倍」 気象研などが過去データ解析」, 西日本新聞, 2020 年 10 月 21 日

今田由紀子, 「豪雨やはり温暖化影響していた 18 年の西日本は 3.3 倍」, 西日本新聞, 2020 年 10 月 21 日

今田由紀子, 「九州豪雨「温暖化で発生率 1.5 倍」 気象研などが過去データ解析」, TEAM 防災ジャパン, 2020 年 10 月 22 日

今田由紀子, 「温暖化で大雨が多くなった?」, 朝日新聞デジタル「ののちゃんの D0 科学」, 2020 年 11 月 14 日

今田由紀子, 「異常気象が異常でなくなった世界」, 岩波「世界」, 2020 年 12 月号

遠藤洋和, 「集中豪雨、温暖化の影響も」, 朝日新聞デジタル, 2020 年 8 月 17 日

石井雅男, 「土曜特集：温暖化と同時に進行「海洋酸性化」」, 公明新聞, 2020 年 12 月 12 日

丹羽洋介, 「世界の CO2 収支 2020 年版を公開 ～国際共同研究（グローバルカーボンプロジェクト）による評価～」, 筑波研究学園都市記者会、環境省記者クラブ、環境記者会、水産庁記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会同時配布, 2020 年 12 月 11 日（国立環境研究所ほかとの共同プレスリリース）

丹羽洋介, 「世界のメタン放出量は過去 20 年間に 10% 近く増加」, 筑波研究学園都市記者会、環境省記者クラブ、環境記者会、文部科学記者会、科学記者会同時配布, 2020 年 8 月 6 日（国立環境研究所ほかとの共同プレスリリース）

松枝秀和, 「民間旅客機が捉えた都市域からの CO2 排出～世界 34 都市上空での CO2 観測データの統計解析～」, 筑波研究学園都市記者会、環境省記者クラブ、環境記者会、気象庁記者クラブ同時配布, 2020 年 5 月 15 日（国立環境研究所との共同プレスリリース）

(アウトリーチ)

今田由紀子, 川瀬宏明, 渡部雅浩, 荒井美紀, 塩竈秀夫, 高薮出, プレスリリース「地球温暖化が近年の日本の豪雨に与えた影響を評価しました」, 2020 年 10 月 20 日

石井雅男, 「深刻化増す海洋の異変-観測データが示す気候変動 海の温暖化・海面上昇・海洋酸性化 IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書と気象庁「海洋の健康診断表」から」 日本記者クラブ 2020 年度記者ゼミ「科学記者の役割」 2020 年 7 月 28 日

石井雅男, 「海の温暖化・海面水位の上昇・海の酸性化 — 現状と予測」 内閣府総合海洋政策推進本部 気候変動が海洋環境及び海洋産業に与える影響について検討するプロジェクトチーム 第 2 回会合 2020 年 12 月 10 日（非公開）

石井雅男, 「気候変動分野と海洋科学の 10 年 — 海の温暖化・海面水位上昇・海の酸性化」 笹川平和財団海洋政策研究所 第 3 回「海洋科学の 10 年」研究会 2020 年 12 月 21 日

石井雅男, 「海洋観測の課題」 内閣府総合海洋政策推進本部 気候変動が海洋環境及び海洋産業に与える影響について検討するプロジェクトチーム第 3 回会合 2021 年 2 月 4 日（非公開）

S 地震と津波の監視・予測に関する研究

研究年次：2年目／5年計画（令和元年度～令和5年度）

研究代表者：干場充之（地震津波研究部 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

〔地震津波研究部〕○勝間田明男（令和2年9月まで）、○干場充之（令和2年10月から）、小林昭夫、田中昌之、露木貴裕、弘瀬冬樹、永田広平、溜渕功史、野田朱美（令和2年8月から）

（副課題2）地震動即時予測に関する研究

〔地震津波研究部〕○林 豊、小木曾仁、小寺祐貴

（副課題3）津波予測に関する研究

〔地震津波研究部〕○山本剛靖、林 豊、対馬弘晃、南 雅晃

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、「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。

(気象研究所の実績)

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。

研究の成果の到達目標

(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。

令和2年度の研究計画

(副課題1)

地殻活動の異常度を表現するための統合的指標の構築のため、その要素となる地震活動の特徴を表す b 値や p 値などの様々な指標の地域毎の時間変動特性および地域差の特徴について調査を継続して行う。各指標の変動特性の統計的な性質を抽出するとともに、それらの指標の変動の物理的背景について検討を行う。

(副課題2)

緊急地震速報のさらなる精度向上・迅速化・堅牢化を目指して、データ同化手法を用いて波動場を正確に推定し、そこから未来の波動場を予測する手法を発展させる。PLUM法の改良を進め、伝播経路特性については地下構造の精緻化を図る。地盤増幅特性の中の位相特性を検討し、長周期地震動を含めた即時予測での継続時間の予測の精度向上を目指す。

(副課題3)

近地津波について津波後続波の観測事例の整理をまとめ、それらの観測事例を再現する津波波源を推定する。遠地津波の減衰過程を説明するMRMSパラメータの改良についてまとめる。遠地津波と近地津波のそれぞれについて観測事例を用い、長時間津波伝播計算による後続波と減衰過程の再現の精度向上のため、沿岸域地形データ等の計算条件設定の改良を試みる。

令和2年度の研究結果

成果の概要

(1) 課題全体

副課題1では、地殻活動に関する個別指標の変動や地域差について調査を進めた。副課題2では、PLUM法の高度化や地震動予測プログラムの計算時間短縮のための効率化を行った。副課題3では、津波観測事例に基づく統計的予測手法の精度評価を行ってその有効性を示した。

(2) 副課題

(副課題1)

- ・中規模繰り返し地震について、近傍のM6クラス以上の地震との関係を調査した。中規模繰り返し地震の発生間隔が平均よりも長くなった後、複数の系列にて常にではないが、次の繰り返し地震までの間に近傍でM6クラス以上の地震の発生が見られることが分かった。そして、2011年東北地方太平洋沖地震以降、その影響を受けた系列では繰り返し間隔が非常に短かつ非定常になり、そのような関係をうかがい知ることができないことも分かった。
- ・規模の大きな内陸地震周辺のM2.0以上の地震活動について、M系列データの積算の傾きの変化を見ることで平均的な規模の時間変化を調査した結果、検知力低下の疑われる地震直後の期間を除いても、数ヶ月程度以上にわたり徐々に平均的な地震規模が低下する傾向が見られた。
- ・2016年熊本地震によるせん断ひずみエネルギー変化(Noda et al., 2020)に対応し、地震活動の規模別頻度分布に違いが見られるか調査した結果、せん断ひずみエネルギー変化が正の領域では、GR則の b 値が一連の活動の開始前に比べて本震後に有意に低下したことが分かった。

(副課題2)

- ・P波を検知する方法を発展させ、初期破壊のP波の上下動成分のみから得られる震度を予測に用いることにより、地盤増幅特性が不明な観測点でも適用できる方法を開発した。同方法を用いると、約2割の地震において従来のPLUM法よりも迅速に警報を発表できることを確かめた。
- ・データ同化と波動伝播シミュレーションを組み合わせた地震動予測プログラムの計算時間短縮のため、MPIやOpenMPを用いた並列化及びMPI通信の効率化に取り組んだ。
- ・密な観測網が利用可能な状況では、(断層破壊の全体を捉える)Mwの即時推定では強い揺れに間に合わず、揺れをモニターする方法が有効であることを事例検証をもとにまとめた。
- ・地盤増幅特性の中の位相特性を適切に取り入れることに取り組んだ。このことにより振幅ばかりでなく継続時間の予測の精度向上につながる。
- ・継続時間も含めた揺れの予測の精度向上を目指し、減衰・散乱・速度構造などの地下構造の詳細

な推定や地盤増幅特性のモデル化を進めている。

- ・予測計算の堅牢化のために、機械学習によって観測点の品質を自動的に監視する方法の検討を進めている。

(副課題3)

- ・近地津波の減衰予測について、沿岸津波観測データへのリアルタイム回帰分析による予測手法を東北地方太平洋沖地震津波に適用して予測性能を評価し、津波最大値の出現後からの予測において概ね±12時間の幅で減衰予測できることを示した。
- ・遠地津波の減衰予測についても同様に、過去事例から得た減衰過程の特徴に基づく減衰式をリアルタイムデータに適用することによって、±12時間程度の幅で減衰予測できることを示した。
- ・沖合で見られる津波減衰の周期依存性が沿岸域における減衰予測に大きく影響しないことを確認した。
- ・カムチャツカ～千島列島で発生する遠地津波について、地震から約48時間後に、津波注意報の基準に達しうるほど津波が高くなる観測事例があり、津波数値計算を行った結果、チリからの反射波が原因であることを示した。
- ・津波数値計算における摩擦項の離散化式表現の改良が計算安定性を高めると同時に計算結果を正確にすることを数値実験により示した。

計画に対する進捗度及び変更点

(1) 当初計画に対する進捗度

当初計画通り、研究は進捗している。

(2) 当初計画から変更した点

なし

本課題の成果から施策や他の研究への波及状況

地震動即時予測に関し、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。

他省庁予算及び共同研究等からの反映状況

(1) 他省庁予算

なし

(2) 共同研究

- ・「地震・津波防災研究分野における連携・協力に関する協定」(JAMSTEC、地震火山部、気象研究所) 地殻変動観測等について情報交換を行った。
- ・TURNkey (EU 連合の Horizon 2020 による応募型の研究課題で、欧州諸国の 21 研究機関により実施) (協力：干場充之) 2019 年 6 月から 36 か月間計画) 日本での緊急地震速報の経験や今後の技術開発について議論することで、EU をはじめとする各国からの参加者の理解を促し、これにより、議論が深まっている。同時に、この議論を通して、地震動即時予測の研究の進展に寄与している。
- ・「緊急地震速報の高度化に関する研究」(気象庁、防災科学技術研究所など) (H28 年度～) 緊急地震速報の運用について気象庁地震火山部が各研究機関と行っている共同研究に参加することで、各機関と連携して研究を進めている。
- ・「地殻変動連続観測等データの流通及び利用に関する協定」(関係大学等) (H23 年度～) 地殻変動解析について情報交換を行った。
- ・災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画 (大学及び関係機関) (令和元～5 年度) 課題「経験的アプローチによる大地震の確率予測のパフォーマンス調査」に参加し地震活動予測について情報交換を行った。また、相似地震調査グループと情報交換を行った。

(3) 公募型共同利用による研究

- ・東京大学地震研究所共同研究 研究集会「固体地球科学における即時予測・即時解析のフロンティ

ア：基礎的研究から利活用まで」(代表者：小寺祐貴)(令和2年度)

地震動即時予測をはじめ関連する即時予測・即時解析手法の情報交換に寄与している。

- ・東京大学地震研究所大型計算機共同利用公募研究(戦略的公募研究)「津波即時予測技術の共進化を可能にする標準評価法とデータセットの創出」(分担：対馬弘晃)(令和2年度)
3次元津波伝播数値モデルを用いた検証は、津波伝播数値モデルの高度化の研究に寄与している。
- ・東北大学災害科学国際研究所共同研究助成公募課題「津波統合モデルを用いたマルチシナリオハザード評価手法の確立」(分担：林豊、対馬弘晃)(令和2年度)
土砂移動等を考慮した津波モデルの知見は、津波減衰過程の研究に寄与している。

(4) 科学研究費補助金

- ・基盤研究(C)「非正常な地震活動に対する点過程モデルと予測手法の開発」(分担：田中昌之)(令和2～4年度)
相似地震を用いた地震活動予測について情報交換を行った。
- ・基盤研究(B)「揺れの数値予報：広帯域時刻歴波形のリアルタイム予測」(代表：干場充之，分担：小木曾仁，小寺祐貴)(平成29～令和2年度)
地震動即時予測を長周期に拡張する研究に寄与している。
- ・若手研究(B)「超高密度観測網に基づく地震動即時予測に向けて：機械学習による地震波の自動識別」(代表：小寺祐貴)(平成29～令和2年度)
地震動即時予測に適用する際のデータの品質管理の研究に寄与している。
- ・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」(代表：小木曾仁)(平成30～令和2年度)
減衰構造や散乱構造を取り入れることによる震度予測精度向上の研究に寄与している。
- ・基盤研究(C) 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(分担：対馬弘晃)(平成30～令和2年度)
非地震性津波の自動検知手法の開発は、津波伝播数値モデルの適用範囲拡張のための研究に寄与している。
- ・基盤研究(B) 沖合津波観測による津波即時予測技術の共進化を可能にする標準評価法の創出(分担：対馬弘晃)(令和元～3年度)
沖合津波観測記録から地震動成分を分離する技術の開発は、津波数値モデルの即時活用の研究に寄与している。

今後の課題

なし

研究成果リスト

(1) 査読論文：8件

1. Kubota, T., T. Saito, H. Tsushima, R. Hino, Y. Ohta, S. Suzuki, and D. Inazu, 2021: Extracting near-field seismograms from ocean-bottom pressure gauge inside the focal area: application to the 2011 Mw 9.1 Tohoku-Oki earthquake. *Geophysical Research Letters*, **48**, e2020GL091664.
2. Ogiso, M., K. Yomogida, 2021: Estimation of relative source locations from seismic amplitude: application to earthquakes and tremors at Meakandake volcano, eastern Hokkaido, Japan. *Earth, Planets and Space*, **73**, 29.
3. Kamaya, N., M. Hoshiya, A. Katsumata and K. Doi, 2021: Continuity of earthquake and tsunami monitoring by Japan Meteorological Agency under critical conditions. *Seismological Research Letters*, **92**, 17-25.
4. 大石裕介, 新出孝政, 山崎崇史, 牧野嶋文泰, 馬場俊孝, 前田拓人, 近貞直孝, 対馬弘晃, 高川智博, 2020: 南海トラフ巨大地震の3次元津波伝播シミュレーション. *土木学会論文集B2(海岸工学)*, **76(2)**, I_259-I_264.
5. Kilb, D., J. Bunn, J. Saunders, E. Cochran, S. Minson, A. Baltay, C. O'Rourke, M. Hoshiya

- and Y. Kodera, 2020: The PLUM earthquake early warning algorithm: a retrospective case study of west coast, USA, data. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, **126**, e2020JB021053.
6. Minson, S., J. Saunders, J. Bunn, E. Cochran, A. Baltay, D. Kilb, M. Hoshiya, and Y. Kodera, 2020: Real-time performance of the PLUM earthquake early warning method during the 2019 M6.4 and 7.1 Ridgecrest, California, earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **110(4)**, 1887-1903.
7. Hoshiya, M. 2020: Too-late warnings by estimating Mw: Earthquake early warning in the near-fault region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **110**, 1276-1288.
8. Nakata, K., A. Katsumata, and A. Muhari, 2020: Submarine landslide source models consistent with multiple tsunami records of the 2018 Palu tsunami, Sulawesi, Indonesia. *Earth, Planets and Space*, **72**, 44.

(2) 査読論文以外の著作物（翻訳、著書、解説）：5件

1. 小寺祐貴, 2020: 特集: 若手研究者・技術者から見た地震工学 《若手研究者・技術者に訊く》. *日本地震工学会誌*, **41**, 47-48.
2. 気象研究所, 2020: 天竜船明レーザー式変位計による地殻変動観測. *地震予知連絡会会報*, **104**, 212-215.
3. 気象研究所, 2020: 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*, **104**, 22-26.
4. 田中昌之, 2020: 中規模繰り返し相似地震の発生状況と発生確率 (2020) . *地震予知連絡会会報*, **104**, 448-452.
5. 気象庁気象研究所, 2020: 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*, **104**, 369-372.

(3) 学会等発表：35件

1. Kodera, Y. and S. Sakai, An unsupervised automatic classification for continuous seismic records: introducing an anomaly detection algorithm to solve the imbalanced data problem, AGU Fall Meeting 2020, 2020年12月, 米国, virtual
2. Kilb, D., J. Bunn, J. Saunders, E. Cochran, S. Minson, A. Baltay, C. O'Rourke, M. Hoshiya and Y. Kodera, The PLUM earthquake early warning algorithm: a case study of two west coast, USA, datasets, AGU Fall Meeting 2020, 2020年12月, 米国, virtual
3. Minami, M., T. Yamamoto, Derivation of Time difference equation using continuous expression in nonlinear long wave equation and evaluation of its discretization error, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
4. Nakata, K., T. Yamamoto, Simulation of reflected tsunami wave caused by the three cases of earthquake off Fukushima prefecture, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
5. Kubota, T., N. Yamamoto Chikasada, H. Tsushima, W. Suzuki, T. Nakamura, and H. Kubo, Tsunami analysis using the S-net pressure gauge records during the Mw 7.0 Off-Fukushima earthquake on 22 November 2016 to reduce the effects of tsunami-irrelevant pressure components, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
6. Tsushima, H., Y. Nishimae, Y. Hayashi, T. Yamamoto, K. Nakata, and S. Aoki, Conceptual design of forecasting-technology development over the next decade for improvement of JMA tsunami warning, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン (招待講演)
7. Nagata, K., Analyses of the temporal change in size distribution of the earthquakes without using "moving window", JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン

イン

8. Tsushima, H. and T. Yamamoto, Operational use of tsunami source inversion in near-field tsunami warning by JMA, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
9. Katsumata, A., K. Miyaoka, T. Tsuyuki, S. Itaba, M. Tanaka, T. Ito, A. Takamori, and A Araya, Slow slips with durations between VLF and short-term SSE, 日本地球惑星科学連合2020年大会, 2020年7月, オンライン
10. Hoshiba, M., The limits of effective earthquake early warning by estimating Mw: From viewpoint of real-time prediction of strong motion, 2020 Seismological Society of America Annual Meeting, 2020年4月, アメリカ, オンライン
11. 小木曾 仁, 地震波振幅から土石流発生 の谷筋を推定できるか?2008年5月20日の雌阿寒岳の事例解析, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「地表・海底の振動記録から探る地震以外の諸現象」, 2021年3月, 日本
12. 野村俊一, 田中昌之, 余震誘発効果を考慮した繰り返し地震の予測, 【ROIS-DS】成果報告会, 2021年2月, オンライン
13. 田中昌之, 中規模繰り返し相似地震と大地震との関連性について, THK19 繰り返し地震再来特性の理解に基づく地殻活動モニタリング研究集会, 2021年2月, オンライン
14. 野口恵司, 林元直樹, 溜瀧功史, 小寺祐貴, Hi-net を活用した IPF 法の高度化, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「固体地球科学における即時予測・即時解析のフロンティア:基礎的研究から利活用まで」, 2021年1月, オンライン
15. 小寺祐貴, 教師なし学習による連続波形記録の自動分類:階層的クラスタリングの導入, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「固体地球科学における即時予測・即時解析のフロンティア:基礎的研究から利活用まで」, 2021年1月, オンライン
16. 小木曾 仁, 地震波振幅を用いた相対震源決定手法の即時解析への活用に関する基礎的検討, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「固体地球科学における即時予測・即時解析のフロンティア:基礎的研究から利活用まで」, 2021年1月, オンライン
17. 久保田達矢, 齊藤竜彦, 対馬弘晃, 日野亮太, 太田雄策, 鈴木秀市, 稲津大祐, 震源直上海底水圧記録に含まれる地震動成分と津波成分の分離, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「固体地球の多様な波動現象へのアプローチ:多量データ解析と大規模計算を両輪に」, 2020年12月, オンライン
18. 小木曾 仁, 蓬田 清, 地震波振幅を用いた相対震源決定法:雌阿寒岳で発生した火山性地震と微動への適用, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「固体地球の多様な波動現象へのアプローチ:多量データ解析と大規模計算を両輪に」, 2020年12月, オンライン
19. 対馬弘晃, 沿岸津波観測データへのリアルタイム線形回帰による近地津波の減衰予測手法の開発, 第10回巨大津波災害に関する合同研究集会, 2020年12月, オンライン
20. 対馬弘晃, 津波の即時予測技術の発展 -東日本大震災から10年-, 令和2年度気象研究所研究成果発表会, 2020年12月, オンライン
21. 小寺祐貴, 初期破壊のP波を用いた PLUM 法:揺れから揺れの予測に基づく地震動即時予測の迅速化に向けて, 日本地震工学会・大会-2020, 2020年12月, オンライン
22. 小木曾 仁, 地震波エンベロープ全体の即時予測:「揺れの数値予報」への前方散乱モデルの導入, 日本地震工学会・大会-2020, 2020年12月, オンライン
23. 大石裕介, 新出孝政, 山崎崇史, 牧野嶋文泰, 馬場俊孝, 前田拓人, 近貞直孝, 対馬弘晃, 高川智博, 南海トラフ巨大地震の3次元津波伝播シミュレーション, 第67回海岸工学講演会, 2020年11月, オンライン
24. 露木貴裕, ボアホール式ひずみ計の埋設初期変化の補正について, 日本地震学会2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
25. 林 豊, 2016年福島県沖の地震を基準とした断層モデルパラメータに対する津波高分布の感度, 日本地震学会2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン

26. 対馬弘晃, 沿岸津波観測データへのリアルタイム線形回帰による近地津波の減衰予測手法の開発, 日本地震学会 2020 年度秋季大会, 2020 年 10 月, オンライン
27. 南 雅晃, 津波の非線形インバージョン グリッドサーチによるすべり量分布の推定 その 1, 日本地震学会 2020 年度秋季大会, 2020 年 10 月, オンライン
28. 小木曾仁, 蓬田清, 地震波振幅を用いたマスターイベント法: 雌阿寒岳で発生した火山性微動への適用, 日本地震学会 2020 年度秋季大会, 2020 年 10 月, オンライン
29. 小寺祐貴, 酒井慎一, 連続波形記録の教師なし自動分類: 不均衡データに対応するための異常検知処理の導入, 日本地震学会 2020 年度秋季大会, 2020 年 10 月, オンライン
30. 弘瀬冬樹, 溜瀧功史, 前田憲二, ETAS モデルは前震の夢を見るか?: 群発的地震活動に基づく地震予測手法を用いた検証, 日本地震学会 2020 年度秋季大会, 2020 年 10 月, オンライン
31. 野田朱美, 齊藤竜彦, 福山英一, 寺川寿子, 田中佐千子, 松浦充宏, 2016 年熊本地震による地殻内せん断歪みエネルギー変化の定量評価: 余震活動との関係, 日本地震学会 2020 年度秋季大会, 2020 年 10 月, オンライン
32. 野口恵司, 林元直樹, 溜瀧功史, 小寺祐貴, Hi-net を活用した IPF 法の高度化, 日本地震学会 2020 年度秋季大会, 2020 年 10 月, オンライン
33. 弘瀬冬樹, 溜瀧功史, 前田憲二, 自然地震カタログと時空間 ETAS カタログに内在する前震活動の特徴の違い: 群発的地震活動を前震活動と仮定して行う本震の発生予測モデルを用いた検証, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020 年 7 月, オンライン
34. 小木曾 仁, 「揺れの数値予報」の並列化コードの開発, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020 年 7 月, オンライン
35. 小寺祐貴, 初期破壊の P 波を取り入れた波動場予測法: 緊急地震速報の PLUM 法の迅速化に向けて, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020 年 7 月, オンライン

受賞・報道・アウトリーチ活動等

(受賞)

- ・気象庁長官表彰「新たな震度予測手法の開発と海底観測網の活用により緊急地震速報の高度化に貢献した功績」(干場充之, 小寺祐貴) (令和 2 年 6 月 1 日)
- ・気象庁長官表彰「沖合津波観測データを活用した津波即時予測手法 (tFISH) の開発により津波警報の改善に貢献した功績」(対馬弘晃) (令和 2 年 6 月 1 日)

(アウトリーチ)

- ・令和 2 年度気象研究所研究成果発表会「津波の即時予測技術の発展 -東日本大震災から 10 年-」(対馬弘晃) (令和 2 年 12 月 16 日～令和 3 年 1 月 27 日)

V 火山活動の監視・予測に関する研究

研究年次：2年目／5年計画（令和元年度～令和5年度）

研究代表者：齋藤 誠（火山研究部 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

[火山研究部] ○小久保一哉、鬼澤真也、安藤 忍、森 健彦、奥山 哲、岡田 純、川口亮平、島村哲也
[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

[火山研究部] ○菅野智之、堀口桂香、谷口無我、森 健彦
[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

[火山研究部] ○新堀敏基、佐藤英一、石井憲介
[気象予報研究部] 橋本明弘

研究の動機・背景

（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必要がある。

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 20 km 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る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)

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)

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。

研究の成果の到達目標

(全体)

地殻変動や火山ガスなどの観測データの解析をとおして、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)

[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)

[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)

[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。

令和2年度の研究計画

(副課題1)

[テーマ1] 観測研究による火山活動の活発化や噴火に至るプロセスの解明

① 伊豆大島等におけるマグマ蓄積・上昇過程の解明

- ・ 伊豆大島の地殻変動観測を継続し、地殻変動（源）解析の迅速化・自動化を目指す。他の活動的火山についても地殻変動等の解析を行う。
- ・ 重力観測データ補正技術の高度化を進めるとともに、伊豆大島において重力の繰り返し精密観測を行う。

② 伊豆大島山頂部における地表放熱量評価

- ・ 地表面の熱収支連続観測を継続し、地表面熱・水収支モデルを検討する。新たに空中熱赤外観測による面的な温度分布の把握を開始する。マグマ・揮発成分収支の関わる観測データ及び活動場の物性の既存資料を調査する。

[テーマ2] 火山活動の解析・評価のための手法開発

① SAR の対流圏遅延補正高精度化

- ・ 気象モデルを用いた対流圏遅延補正プログラムの開発を進める。

② GNSS 解析手法の高度化

- ・ 気象モデルを導入した大気遅延補正による解析プログラムの開発を進める

③ マグマの状態・活動を地殻変動などから推定するための手法開発

- ・ 地殻変動データから変動源の変化の推定手法、地下のマグマ挙動に伴う地殻変動シミュレーション手法の開発を進める。

[テーマ3] 監視観測データの活用的高度化

① 地震波形の観測点間の相互相関解析による地震波速度変化のモニタリング

- ・ 地震波干渉法を用いて伊豆大島地下の地震波速度構造を求め、その時間変化の検出を試みる。

(副課題2)

[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

吾妻山、箱根山、草津白根山及び霧島山等を主な対象として、火山ガス及び熱水流体について化学組成及び水素・酸素安定同位体比を分析する。また、噴火中の火山ガスの化学組成及びその変化の推定のために、火山灰から抽出した水溶性物質の化学分析を実施する。以上の変化を噴気域や放出量、放出温度の変化等の表面現象の観測や、地震、地殻変動等の物理観測の結果と比較し、火山活動の推移を総合的に評価する手法の検討を進める。

さらに、福岡管区気象台が地方共同研究の成果を活かして実施するガス検知管や湧水の観測等に協力するとともに、将来的に火山ガス等の化学分析を火山機動観測と連携して効率的に実施する方法について検討を行う。

[テーマ2] 火山ガス活動のモニタリングに関する研究

センサーによる火山ガス観測の有効性を検証するため、本庁整備の多成分火山ガス観測装置、気象研整備の可搬型マルチガス観測装置及び直接採取による化学分析のそれぞれから得られるガス成分比について比較し、センサー観測のデータ精度や感度変化の補正手法などについて検討する。また、土壌ガスの連続観測を吾妻山で継続するとともに、面的な繰り返し観測を複数の火山で実施して基礎データと知見の蓄積を行う。

二酸化硫黄放出率のリアルタイム観測へ向け、令和元年度に整備した試験機を用いた試験観測を行い、令和3年度以降の本格展開に向けたハード及びソフトのブラッシュアップを行う。また、気象場と噴煙拡散モデルを利用した二酸化硫黄ガス拡散モデル化について、二酸化硫黄カメラを利用した実況とモデルとの比較検討を試みる。

以上の観測研究成果を火山監視・警報センターの監視業務で活用するため、本庁関係官と連携しつつ火山監視情報システムへの実装に向けた検討を開始する。

(副課題3)

[テーマ1] 気象レーダー・衛星等による噴火現象の観測

気象レーダー等による噴煙の解析結果を、降灰や大気中の火山灰の実観測データによって検証するスキームを確立する。

[テーマ2]

① 新しい移流拡散モデルの開発・改良

領域移流拡散モデルと全球移流拡散モデルを統一した、新しい移流拡散モデルを開発して、設計内容の技術報告を作成する。

② 火山灰データ同化・予測システムの構築

火山灰データ同化システムと新しい移流拡散モデルを結合した、火山灰データ同化・予測システムにおける予報官解析の利用について、現業化に必要な機能の追加を行う。また、耐久試験を兼ねた並行運用試験を行う。

令和2年度の研究成果

成果の概要

(1) 課題全体

- ・ 伊豆大島を対象としたGNSS・光波測距等による地殻変動観測、重力の精密観測、山頂域の地表面熱収支連続観測を継続するとともに、空中熱赤外観測を開始した。重力解析では補正方法の検討によりデータの信頼性を向上させた。また、干渉SAR対流圏遅延補正プログラム、境界要素法による地形を考慮した地殻変動計算プログラムの開発を進めた。
- ・ 箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山、吾妻山及び焼岳周辺を対象に、火山ガス及び熱水流体の化学組成及び水素・酸素安定同位体比を分析し、それらの変化と火山活動との関連を調査する

とともに、一部の火山ではマグマ熱水系構造の考案を進めた。熱水系での火山活動のモデルを構築するための事例研究を行った。二酸化硫黄放出率の連続モニタリングに向けた測器の開発・試験観測及び改良、マルチガスの業務化に向けたデータ補正手法等の開発を実施した。

- ・ 2次元ビデオディストロメーターによって直接観測された降灰データを用いて、気象レーダーによる解析結果を検証するためのスキームを考案した。新しい移流拡散モデルを開発し、その設計内容について気象研究所技術報告を発行した。火山灰データ同化システム（プロトタイプ）を気象庁移流拡散モデルと結合して、合わせて現業化した。

(2) 副課題

(副課題1)

[テーマ1]：観測研究による火山活動の活発化や噴火に至るプロセスの解明

① 伊豆大島等におけるマグマ蓄積・上昇過程の解明

- ・ 伊豆大島においてGNSS、光波測距、多成分ひずみの地殻変動観測を継続し、その解析からマグマだまりのマグマ蓄積量の変化を推定した（火山噴火予知連絡会に報告）。GNSS自動解析に必要な解析システムの処理装置、及び旧式の観測装置を更新した。
- ・ 吾妻山、霧島山、口永良部島で、地殻変動解析で変動源を推定し、火山活動評価に資する結果を得た。西之島の噴火活動で、衛星データを解析してマグマ噴出率の推移を推定した。
- ・ 伊豆大島の重力繰り返し精密観測を継続するとともに、相対重力計の種類や個体差によるバイアスを取り除く手法を検討した。個体差について、絶対重力値を用いたスケール検定・校正による測定値の信頼性の向上を確認した。また観測点での重力鉛直勾配の実測値及び理論モデルからの推定値を機械高補正に導入して、2種の重力計の差を解消する効果を確認した。

② 伊豆大島山頂部における地表放熱量評価

- ・ 噴気活動が認められるカルデラ南部地域において、2017年以降に3回行った1m深地温マッピング観測（2017.10-11, 18.03, 18.07）と、領域内に設置した参照点の連続観測データにより、マッピングした各点を季節変動に従う点と火山活動による地温兆候が認められる点に分離し、後者は現在も噴気が視認できる地域あるいは過去に噴気の認められた地域に一致することを確認した。
- ・ 空中熱赤外線繰り返し観測（今年度から継続）の初回を実施し、熱赤外面像を作成した。また可視観測によるDEMを作成した。

[テーマ2]：火山活動の解析・評価のための手法開発

① SARの対流圏遅延補正高精度化

- ・ 干渉SAR対流圏遅延補正プログラムの開発を進め、対流圏遅延量を積分で求める座標系の変更により、座標変換の回数を減らして計算速度を大幅に向上させた。また、地表面の気象要素として従来の近傍モデル面の内外挿値に対して、地表面解析値を用いる手法を試み、さらに改良課題があることを示した。

② GNSS解析手法の高度化

- ・ GNSSの火山活動が静穏な時期の複数年の時系列データから、非火山性の変動（トレンドおよび季節変動）を評価して、全期間の時系列データを補正することにより、火山性の変動の時期と変動領域を明瞭に確認できた（吾妻山）。

③ マグマの状態・活動を地殻変動などから推定するための手法開発

- ・ 標高の高い火山で、火口下浅部の圧力源による地殻変動データへの山体地形の影響を境界要素法により計算し、従来の手法の適用限界を示した。
- ・ 境界要素法による地形を考慮した地殻変動計算システムの開発を進め、今後の監視業務への導入に向けた検討課題を示した。山体地形モデル作成及び計算結果作図機能を追加し、18火山で山体地形メッシュ作成及び圧力源モデルの設定を可能にした。

[テーマ3]：監視観測データの活用的高度化

① 地震波形の観測点間の相互相関解析による地震波速度変化のモニタリング

- ・ 地震波干渉法（相互相関解析）により、これまでに大規模なカルデラやカルデラ縁火山で検出されているS波異方性について、そうではない浅間山に同手法を適用し、Reyleigh波及びLove波の位相速度トモグラフィーを調査して、周波数に依存する低速度異常領域の特

徴を明らかにした。

(副課題2)

[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

- ・ 箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山、吾妻山、焼岳及びTaal火山（フィリピン）を対象に、火山ガス及び熱水流体の化学組成、水素・酸素安定同位体比、並びに火山灰の水溶性成分を分析し、それらの変化と火山活動との関連を調査するとともに、マグマ-熱水系での火山活動のモデルを構築するための研究を行った。
- ・ 東海大学との共同研究を実施している箱根山では、2019年度までに噴気のCO₂/H₂S比とHe/CH₄比が火山性地震の回数と対応良く変化することから火山活動評価の指標として有効であることを明らかにし、次回の活動を予測するために引き続き地球化学データを蓄積し、火山噴火予知連絡会等に情報提供を実施した。
- ・ 草津白根山では東海大学、東京工業大学と共同で観測を実施し、火口湖湯釜の湖水のMg/Cl比が過去の噴火・噴出現象に対応して変化したことに着目して分析を続けた結果、2019年夏以降に湯釜湖水のMg/Cl比に僅かな上昇が起きたことを明らかにし、引き続き火山噴火予知連絡会に資料を提供した。
- ・ 霧島山硫黄山では東海大学、東京大学などと共同で熱水や火山ガスの観測を実施し、2018年4月の噴火前後で増加した硫黄山周辺の熱水のCl/SO₄比が2019年以降低下に転じたが、硫黄山西麓の火口跡の熱水は2020年の夏以降同比が再び上昇したことを捉えた。また、火山活動に関連した火山ガスの変化として2018年4月の噴火の前にSO₂やH₂の濃度の増加があったことを示した。
- ・ 長野地方気象台から提供された焼岳1962年噴火火山灰については化学分析及び顕微鏡分析を実施し、当該火山灰は熱水系での爆発によってもたらされたことを明らかにし、その結果を焼岳・乗鞍岳火山防災協議会の事務局に資料として提供した。
- ・ 2020年4月頃から発生した飛騨地方の群発地震に伴って異常湧出した焼岳山麓の高温泉の化学組成や安定同位体比を分析し、高温泉の異常湧出は焼岳の火山活動とは直接的な関係はないことを明らかにし、地元気象台に資料を提供するとともに、温泉水の専門学会誌に論文を掲載した。
- ・ フィリピンTaal火山については噴火後の火口湖からフィリピン火山地震研究所が採取した熱水の提供を受け、噴火の前後で化学成分及び安定同位体比に変化が起きていたことを明らかにし、フィリピン火山地震研究所に情報を提供した。

[テーマ2] 火山ガス活動のモニタリングに関する研究

- ・ 可搬型マルチガス観測装置により吾妻山及び九重山において本庁整備の連続マルチガス観測装置周辺で観測を行う等、連続マルチガスデータの解析・補正手法について引き続き本庁と共同で検討を行った。また、産業技術総合研究所と共同して吾妻山で比較観測を実施し、マルチガスの器差に関する検証を行った。
- ・ 二酸化硫黄(SO₂)放出率計測の自動化へ向け、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)で行われた先行観測研究を元に課題の洗い出しと解決策の検討を行い、試験機の開発、試験観測及び改良を行った。

(副課題3)

[テーマ1] 気象レーダー・衛星等による噴火現象の観測

- ・ 気象庁一般気象レーダーを用いて、2020年6月4日2時59分桜島爆発的噴火の事例の噴煙高度を解析した結果、火口上約8000m以上に達していたことが分かった。
- ・ 桜島の遠望観測データを用いて、気象レーダーによる噴煙高度の確率的推定手法の検証を進めた。また、確率的推定手法について、大気屈折率・地球楕円体の効果の組み込み、ジオイド補正を追加するなどの改良も行った。
- ・ 気象研究所XバンドMPレーダー(MRI-XMP)による噴煙観測と2次元ビデオディストロメーター(2DVD)による降灰観測を継続している。
- ・ 2DVDによって直接観測された降灰データを用いて、気象レーダーによる解析結果を検証するためのスキームを考案した。概要としては、レーダーによって解析された粒径分布(及び形状)を持つ粒子群を仮想的に落下させ、2DVDによる観測値と比較する。ただし、

2DVD データは固定観測点で得られるものであるため、原理上、検証可能な粒径が制限されることに注意が必要である。

[テーマ2]

① 新しい移流拡散モデルの開発・改良

- ・ 領域移流拡散モデルと全球移流拡散モデルを統一した新しい気象庁移流拡散モデル (JMA-ATM) を開発し、その設計内容について気象研究所技術報告を発行して、現業化した。

② 火山灰データ同化・予測システムの構築

- ・ JMA-ATM と結合した火山灰データ同化・予測システムを用いて、予報官による衛星解析に対する検証を行い、同システムで作成した初期値を用いることで火山灰雲の中心位置・火山灰雲の面積の予測が改善することを確認した。
- ・ 検証事例を通して異常終了や予期しない計算が発生しないことを確認した。また、一部業務(航空路火山灰情報/定時拡散・降灰予測図)において、気象庁数値解析予報システム (NAPS) を用いて耐久試験を兼ねた試験運用を実行した。
- ・ JMA-ATM と合わせて火山灰情報提供システム (VAFS) への実装し、現業化した。

計画に対する進捗度及び変更点

(1) 当初計画に対する進捗度 (計画した線表通りに研究が進捗しているかを記述)

副課題1については、各テーマとも概ね当初計画通り進捗している。伊豆大島の各種の観測を継続し、GNSS 解析自動化に向けて観測装置を更新した。重力観測では、今後のマグマ上昇モニタリングに向けたデータの信頼性を向上させた。今年度から計画していた空中熱赤外観測を予定通り開始した。熱・水収支モデルに関連して、カルデラ南部の地温実測値の分布の噴気地と関連する特徴が得られた。衛星 SAR の対流圏遅延補正高精度化において、計算法の工夫で解析時間を大幅に短縮できた。マグマの状態を地殻変動から推定する手法は、地下の圧力源による地殻変動を、地形を考慮して計算する手法開発を計画通り進めた。

副課題2については、各テーマとも概ね当初計画通り進捗している。土壌ガスの連続観測は、機器の動作不良によりデータの蓄積が少なく本格的な解析に至っておらず、安定的に連続稼働させるための測器の改良を進める。

副課題3については、概ね当初計画通り進捗している。

(2) 当初計画から変更した点 (研究手法の変更点など)

副課題3テーマ1で使用している Ku バンド高速スキャンレーダーについては、機器故障に伴い、天頂観測のみ実行することに変更した。

本課題の成果から施策や他の研究への波及状況

(外部機関や所内外の研究課題への波及効果)

- ・ 箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山、焼岳等の火山ガスや熱水、火山灰の研究で得られた成果は、火山噴火予知連絡会や火山監視課へ提供することで気象庁の火山活動評価へ貢献しているほか、地元火山防災協議会への提供や専門の学会および雑誌での公開を通じて防災や学術の側面から貢献を図っている。また、フィリピン Taal 火山の火口湖の熱水の研究成果は、現地のフィリピン火山地震研究所と共有し、火山学的な国際的貢献・交流を実施した。
- ・ その他、桜島噴火時の気象レーダーを利用した噴煙高度の推定結果、西之島、霧島山、諏訪之瀬島等の ALOS-2 合成開口レーダー観測・解析結果等についても、火山噴火予知連絡会や火山監視課へ提供して、気象庁の火山活動評価への貢献を行っている。
- ・ 令和2年度末に更新された火山灰情報提供システムに新しい移流拡散モデルのインストール作業を進めた。
- ・ ALOS-2 の防災利用実験に参画し、火山ワーキンググループの枠組みで関係機関と観測データ、解析結果を共有することで効率的な研究推進を図っている。
- ・ 「災害の軽減に貢献する地震火山観測研究計画 (第2次)」に基づく研究と相互に情報交換を行い、連携することで相互にレベルアップが可能となる。
- ・ 副課題3テーマ2で開発手した JMA-ATM は、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト (平成28~令和7年度) 課題C「火山噴火の予測技術の開発」サブテーマ3「シミュレーションに

による噴火ハザード予測手法の開発」で行う大規模噴火を想定した降灰ハザード予測モデルの開発に寄与している。また、SIP 第 2 期「国家レジリエンス（減災・防災）の強化」テーマ 2「被災情報の解析・予測」の中で行う「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」へ適用する予定。

他省庁予算及び共同研究等からの反映状況

（他省庁予算等研究課題から本課題への波及効果）

（1）他省庁予算

次世代火山研究推進事業（文部科学省）

課題 B：先端的な火山観測技術の開発

（サブテーマ 2：リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発、サブテーマ 2-1：可搬型レーダー干渉計と衛星 SAR による精密地殻変動観測技術の開発）

複数の火山における衛星 SAR 解析を実施し、解析結果を本研究でも活用した。

（サブテーマ 3：地球化学的観測技術の開発）

箱根山、那須岳、霧島山硫黄山、九重山などの複数の火山において、火山ガスや熱水の地球化学観測を行い、一部の観測データは火山噴火予知連絡会にも提供した。

課題 C：火山噴火の予測技術の開発

（サブテーマ 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）

マグマ移動モデルの研究開発に参画し、地殻変動計算手法の開発を行っている。

（2）共同研究

- ・京大防災研、防災科研、気象庁、気象研 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）（R1 年度～）
研究のための観測データ流通の枠組みとして活用した
- ・神奈川県温泉地学研究所 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（H29～R4 年度）
活動モニタリングとして SO₂ 放出率観測を箱根山で共同で実施した。
- ・東海大学 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（H29～R4 年度）
箱根山、草津白根山等で共同観測を実施するとともに、分析装置の相互利用を活用して地球化学データを収集、それらの成果は火山学会や日本地球惑星科学連合大会などの専門会議で発表し、一部の観測データは火山噴火予知連絡会にも提供した。
- ・鹿児島地方气象台（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（令和 2～4 年度）
二重偏波レーダーを用いた火山噴煙解析事例の選定を行っている。今後は、それらの事例について、副課題 3 テーマ 1 とも連動する形で、解析を行う予定。
- ・鹿児島大学 気象レーダーを活用した火山噴煙に関する研究（平成 26～令和 3 年度）
船舶レーダーを用いた噴煙柱・噴火雲の観測を行っている。副課題 3 テーマ 1 とは、レーダー観測の可能性や問題点など議論・整理しながら、協調して進めている。

（3）公募型共同利用による研究

- ・東京大学地震研究所共同利用 伊豆大島火山マグマ活動の解明に向けた精密重力観測
地震研究所が島内で実施した絶対重力観測データとの比較により、本課題で使用している相対重力計の観測の信頼性が向上した。また両者の観測した重力データの空間分布を合わせた解釈が可能になる。
- ・東京大学地震研究所共同利用 SAR を用いた多角的な地殻・地表変動研究
衛星 SAR を用いた地殻変動の解析技術の技術的課題を検討していくものであり、本課題の研究の進展に大きく寄与している。
- ・東北大学災害科学国際研究所共同研究 蔵王・御釜における水・熱・化学物質収支から見た地下水流動系の解明
御釜およびカルデラ周辺の熱活動評価を担当し、分室研究官として地域の火山活動研究の

- 成果を提供している。
- ・ 東北大学東北アジア研究センター 蔵王山・御釜火口の活動調査
火山学的な現地調査を担当し、分室研究官として地元研究者と地域の火山活動の共同研究を行い、その知見を提供している。
 - ・ 東京大学地震研究所共同利用（地震・火山噴火の解明と予測に関する公募研究） 水蒸気噴火が懸念される火山におけるマグマ起源流体の挙動解明と火山活動評価（大場 武、谷口無我、ほか 令和2年度）
箱根山、草津白根山等において火山ガスや熱水を対象とした地球化学的な観測を大学の研究者と共同研究で実施した。
 - ・ 東京大学地震研究所外来研究 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（令和2年度）
副課題3テーマ2に関連して、昨年度に開発した移流拡散堆積系における逆解析手法を用いて、噴火発生時に効率的に降灰観測点を配置する方法を示した。

（4）科学研究費補助金

- ・ 火山ガス成分と火山物理の融合的観測・分析による火山活動度の評価の研究（研究代表者：高木朗光（気象庁地震火山部火山課火山活動評価解析官、気象研究所併任）、平成29～令和2年度）
複数の火山において、火山ガス等の試料採取を行った。また、センサー観測に関する研究について、副課題2テーマ2と併せて現地調査等を実施することにより、効率的に研究を推進している。

今後の課題

副課題1テーマ2のGNSS解析手法の高度化について、気象モデルによる大気伝搬遅延の補正を計画していた。一方、火山性の地殻変動の検知力向上と正確な解析のためには、データから非火山性の広域の変動を除去する手法や、原因が必ずしも特定できない年周変動を汎用的に低減する手法などによる補正も重要であり、総合的なノイズの低減について研究が必要である。

副課題2テーマ1の化学分析については、引き続き熱水系が発達する火山における地球化学的な知見を蓄積し、火山活動のモデル化を進める。これらの観測のほかに、新たに火山活動に変化がみられた火山が出てきた場合には臨時的観測を行う等が必要であるが、火山ガスや熱水、火山灰等の観測や分析を担う研究官が不足しており、共同研究の枠組みの活用はもとより様々な方策を検討していく必要がある。

副課題2テーマ2のセンサー観測については、観測研究成果を火山監視・警報センターの監視業務で活用するため、本庁関係官と連携しつつ火山監視情報システム更新等のタイミングも見据えながら実装に向けた検討を行っていく必要がある。

研究成果リスト

（1）査読論文：3件

1. Ohba, T., M. Yaguchi, U. Tsunogai, M. Ito and R. Shingubara, 2021: Behavior of magmatic components in fumarolic gases related to the 2018 phreatic eruption at Ebinokogen Ioyama volcano, Kirishima Volcanic Group, Kyushu, Japan. *Earth, Planets and Space*, **73**, 81.
2. Yaguchi, M., 2020: Abnormal discharge of high-temperature hot spring water observed at the abandoned well in the Okuhida hot spring area during the earthquake swarm occurred at Gifu-Nagano district, central Japan. *Journal of Hot Spring Sciences*, **70**, 70-79.
3. 村松容一, 谷口無我, 2020: 山梨県増富温泉の水質形成機構. *温泉科学*, **70**, 124-136.

（2）査読論文以外の著作物（翻訳、著書、解説）：3件

1. 新堀敏基, 石井憲介, 2021: 気象庁移流拡散モデル設計書. *気象研究所技術報告*, **84**.
2. 真木雅之, 小堀壮彦, 西隆昭, 藤吉康志, 徳島秀彦, 佐藤英一, 井口正人, 爲栗健, 2020: 船舶レーダによる桜島火山の噴煙柱モニタリングー2018年の観測結果ー. *京都大学防災研究所年報*, **63-B**, 136-148.

3. 柳澤宏彰, 飯野英樹, 安藤忍, 高木朗充, 及川輝樹, 2020: 西之島の2020年6~8月のバイオレント・ストロンボリ式噴火. *火山*, **65**, 119-124.

(3) 学会等発表 : 31 件

1. Sato, E., M. Iguchi, Ash fall observation using 2D-Video Disdrometer, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年8月, オンライン
2. Satoshi Okuyama, Shinobu Ando and Toshiki Shimbori, Development of InSAR tropospheric phase delay correction system at MRI (4th report), JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
3. 大場 武, 谷口 無我, 沼波 望, 笹井 洋一, Barairo Maria, Alanis Paul, Bornas Ma. Antonia, 楠本 成寿, 長尾 年恭, 角皆 潤, 伊藤 昌稚, 新宮原 諒, VARIATION IN THE CHEMICAL AND ISOTOPIIC COMPOSITION OF FUMAROLIC GAS AT TAAL VOLCANO, PHILIPPINE PRIOR TO THE 2020 ERUPTION, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
4. 外山 浩太郎, 角野 浩史, 谷口 無我, 大場 武, 豊福 高志, 和田 茂樹, Noble gas composition in hot spring gas in Shikine Island, Izu-Bonin volcanic arc, Japan, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
5. 安藤忍, 奥山哲, 松末伸一, Lava discharge rate in Nishinoshima volcano, Ogasawara Islands revealed using ALOS-2/PALSAR-2, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
6. 長岡優, 地震波干渉法による霧島山の3次元 V_{SV} , V_{SH} 構造, 東京大学地震研究所特定共同研究(B)「プレートの沈み込みと島弧変動のダイナミクス」オンライン集会, 2021年1月, オンライン
7. 奥山哲, 安藤忍, 新堀敏基, 気象研究所における干渉 SAR 対流圏遅延補正プログラムへの地上面解析値の導入, 東京大学地震研究所共同利用(研究集会)「SARによる地表変動解析の新展開: 先進レーダー衛星の活用を見据えて」, 2020年12月, 不明
8. 安藤忍, 奥山哲, 飯野英樹, 西之島における SAR 解析, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「SARによる地表変動解析の新展開: 先進レーダー衛星の活用を見据えて」, 2020年12月, オンライン
9. 谷口 無我, 焼岳周辺の地震活動に伴って観測された奥飛騨温泉郷の枯渇源泉からの高温泉の流出, 日本地球化学会 第67回オンライン年会, 2020年11月, オンライン
10. 奥山 哲, 安藤 忍, 新堀 敏基, 気象研究所における干渉 SAR 対流圏遅延補正プログラムへの地上面解析値の導入, 日本測地学会第134回講演会, 2020年10月, 不明
11. 安藤忍, 奥山哲, 飯野英樹, 小笠原諸島西之島の溶岩噴出率の算出の試み, 日本測地学会第134回講演会, 2020年10月, 不明
12. 石井憲介, 小屋口剛博, 火砕物の移流拡散堆積過程の逆問題の数値構造とその応用に向けての考察, 火山学会2020年秋季大会, 2020年10月, (オンライン)
13. 井村匠, 伴雅雄, 常松佳恵, 後藤章夫, 岡田純, 蔵王火山丸山沢噴気地熱地帯の火山物質科学的研究, 日本火山学会2020年度秋季大会, 2020年10月, 日本
14. 佐藤英一, 瀧下恒星, 井口正人, 二次元ビデオディストロメーターによる降灰観測(初期解析結果), 日本火山学会2020年度秋季大会, 2020年10月, 日本
15. 川口 亮平, 境界要素法による火山周辺の地殻変動計算システムの開発, 日本火山学会2020年度秋季大会, 2020年10月, 日本
16. 鬼澤真也, 石原昂典, 平山康夫, 松田健助, 谷口無我, 松島喜雄, 伊豆大島火山における1m深地温測定~経験的手法による地熱兆候の検出~, 日本火山学会2020年度秋季大会, 2020年10月, 日本
17. 角野浩史, 外山浩太郎, 小長谷智哉, 滝口孝寛, 大場武, 谷口無我, 霧島火山群におけるヘリウム同位体比の時空間変動, 日本火山学会2020年度秋季大会, 2020年10月, 日本
18. 大場武, 谷口無我, 角皆潤, 伊藤昌稚, 新宮原諒, えびの高原硫黄山火山ガス組成と2018年水

蒸気噴火の関係, 日本火山学会 2020 年度秋季大会, 2020 年 10 月, 日本

19. 小長谷智哉, 角野浩史, 外山浩太郎, 川名華織, 山根康平, 大場武, 谷口無我, 寺田暁彦, 草津白根火山周辺の噴気ガス・温泉ガス中の希ガス同位体組成, 日本火山学会 2020 年度秋季大会, 2020 年 10 月, 日本
20. 代田 寧, 大場 武, 谷口無我, 十河孝夫, 原田昌武, 箱根火山における噴気組 (CO₂/H₂S 比) 変化速度と火山活動強度の関係, 日本火山学会 2020 年度秋季大会, 2020 年 10 月, 日本
21. 橋本明弘, 森健彦, 新堀敏基, 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 2, 日本火山学会 2020 年度秋季大会, 2020 年 10 月, 日本
22. 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, 湧水・2018 年噴火口跡熱水の化学組成変化から見た霧島山(硫黄山)の熱水活動, 日本火山学会 2020 年度秋季大会, 2020 年 10 月, オンライン
23. 長岡優, 西田究, 青木陽介, 武尾実, 浅間山の 3 次元 3 次元 V_{SV}, V_{SH} 構造, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020 年 7 月, オンライン
24. 寺田 暁彦, 香取 慧, 谷口 無我, 山本 希, 山田 大志, 鬼澤 真也, 西澤 達治, 青山 裕, 森田 裕一, 大場 武, 草津白根火山西方における温泉湧出と 2018 年群発地震, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020 年 7 月, オンライン
25. 角野 浩史, 外山 浩太郎, 大場 武, 谷口 無我, 寺田 暁彦, 草津白根火山の火山ガスのヘリウム同位体比, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020 年 7 月, オンライン
26. 鈴木 レオナ, 寺田 暁彦, 谷口 無我, 高橋 昌孝, 大場 武, 草津白根火山・湯釜火口湖水の不均質性から推定される湖底熱水の化学的特徴, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020 年 7 月, オンライン
27. 角野 浩史, 外山 浩太郎, 大場 武, 谷口 無我, 霧島火山群における火山ガスのヘリウム同位体比の時空間変動, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020 年 7 月, オンライン
28. 沼波 望, 大場 武, 谷口 無我, 箱根火山の地球化学的モニタリング, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020 年 7 月, オンライン
29. 谷口 無我, 大場 武, 寺田 暁彦, 草津白根山湯釜火口湖の化学組成変化, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020 年 7 月, オンライン
30. 川口亮平, 境界要素法に基づく火山周辺の気象庁傾斜計データの評価の検討(2), 日本地球惑星科学連合 2020 年大会, 2020 年 5 月, オンライン
31. 佐藤英一, 気象レーダーを用いた火山噴煙解析結果の検証について, 日本気象学会 2020 年度春季大会, 2020 年 5 月, オンライン

受賞・報道・アウトリーチ活動等

1. 佐藤英一: 気象研究所からのお知らせ「本年 6 月 4 日桜島噴火の噴煙高度は約 8,000m 以上～気象レーダー観測網による観測結果から推定～」(令和 2 年 7 月 14 日)
2. 佐藤英一: 読売新聞オンライン「桜島の噴煙、過去最大級の高さ 8000m 超か... 6 月 4 日噴火」(令和 2 年 7 月 14 日)
3. 佐藤英一: 毎日新聞オンライン「桜島で過去最も高い噴煙 6 月の噴火、9000 メートル超も」令和 2 年 7 月 15 日
4. 佐藤英一: 日経電子版「桜島で過去最も高い噴煙 6 月の噴火、9 千メートル超も」令和 2 年 7 月 15 日
5. 佐藤英一: 産経新聞オンライン「桜島で過去最も高い噴煙 6 月の噴火、9 千メートル超も」令和 2 年 7 月 15 日
6. 佐藤英一: 共同通信「桜島、過去最も高い噴煙を観測 6 月の噴火、9000m 超も」令和 2 年 7 月 15 日
7. 佐藤英一: NHK NEWS WEB「桜島 先月 4 日の噴火 噴煙の高さは 9000m 以上か」令和 2 年 7 月 15 日
8. 佐藤英一: 日経電子版「桜島の 6 月噴煙、過去最高 9000 メートル超 気象庁推定」令和 2 年 7 月 16 日

9. 佐藤英一：毎日新聞社会面「桜島は噴煙 9570 メートル 過去最高を観測」（令和2年7月16日）
10. 佐藤英一：朝日新聞デジタル「鹿児島）6月4日の桜島噴火、噴煙 9000m 台か」（令和2年7月17日）

全天カメラによる雲の地上観測システムの開発

研究年次：1年目／2年計画（令和2年度～令和3年度）

研究代表者：工藤 玲（気象観測研究部第一研究室主任研究官）

研究担当者：

〔大阪管区气象台〕高野松美、井本 忍、河野真也、谷澤隼人

研究の動機・背景

雲は、地球表面の約60%を覆い、大気放射収支、そして気候変動に最も大きな影響を持つ。しかし、その影響評価は、非常に不確実でもある。精密な雲観測が必要であるが、近年の衛星観測の高解像度化・高頻度化により、雲の分布をより精密に捉えることが出来るものの、上層雲に阻まれた下層の雲を観測することが出来ないという限界がある。一方、発展著しい高解像度数値気象モデルにおいても、雲の再現性は十分ではない。これらの問題に対し、雲の三次元的な分布を定量化する地上観測手法を確立することで、正確な大気放射収支に加え、衛星観測データや数値気象モデルの出力の検証、さらにそれらを通じて数値気象モデルの雲表現に関するパラメタリゼーションに貢献することが出来る。近年の衛星観測の進歩に伴い、気象業務における目視観測の重要性は相対的に下がり、目視観測地点も縮減傾向にある。しかしながら、上記の衛星観測の限界等、現業業務における問題は多々あり、目視観測の必要性は依然失われてはいない。そこで、目視観測を代替する観測システムの開発が必要であると考えた。

研究の目的

上記の研究・業務背景のもと、気象研究所のD3課題「衛星・地上放射観測および放射計算・解析技術の開発」では、これまで、屋外で全天の雲画像の連続観測を可能とする全天カメラを開発してきた。本研究では、全天カメラによる撮影画像から、雲分布や高度分布を定量化する手法を開発することを目的とする。そのため、LTE/3G回線を使って、カメラの遠隔操作、サーバーへのデータ転送、そして、雲の解析とその結果を公開する一連のシステムを構築する。さらに、この全天カメラによる地上観測システムによって、雲解析の結果を観測業務の現場に提供し、現業活用に関する効果を実証する。

研究の目標

- ① 観測システムの構築
全天カメラの画像を準リアルタイムで観測業務の現場に提供。
- ② 雲プロダクトの開発
雲分布、高度分布を定量化。
- ③ 業務活用の調査
観測現業の担当者による活用法の調査。

令和2年度の研究計画

- ① 観測システムの構築
全天カメラの観測を通年で実施する。
データ解析・公開システムの構築する。
- ② 雲プロダクトの開発
雲分布の定量化する手法を開発する。
雲の高度分布の定量化する手法を開発する。
- ③ 業務活用の調査
観測現業に入った担当者が全天カメラ画像を実際に見て、現業での活用法の調査をする。

令和2年度の研究結果

研究の進捗状況及び成果

- ① 観測システムの構築
 - ・3月に大阪管区の屋上に全天カメラを設置。観測開始。
 - ・準リアルタイムでデータ転送、加工、公開システムを構築。
 - ・気象研のNextcloudから公開。スマホからも閲覧可能。

- ・当日夜にその日の動画を作成し、公開。
- ・現在まで安定に運用（目標達成）。

② 雲プロダクトの開発

画像解析の基本処理を実施（気象研）。

- ・ピクセル毎の方位を同定するためのキャリブレーションを実施。
- ・建物等の障害物を排除するためのマスクを作成。
- ・全天カメラの生データの数値を取り出し、画像処理・解析を行うため基本処理の専用ライブラリを python で開発。大阪管区へ提供。

雲分布プロダクトを開発（大阪）。

- ・開発したライブラリを用いて、RGB を色相・彩度・明度に変換し、雲ピクセルを判別するプロトタイプを開発。
- ・現在は、様々なシーンに適用し、高精度化を図る。
- ・プロダクトの検証のための目視観測データベースの構築を開始。

雲の高度分布プロダクトの開発（気象研）

- ・30秒の時間差画像で試行中。
- ・2枚の画像からテンプレートマッチングにより、雲をトラッキングし、雲の移動ベクトルを導出。
- ・三角測量により、高度の指標を導出。目標達成の見通しが立った。

③ 業務活用の調査

全天カメラのハード面に対する意見。

- ・雲量、種類、天気を判別するには鮮明さが不足。
- ・雨、雪対策が必要。

全天カメラのソフト面に対する意見。

- ・水平方向の画像が鮮明になれば、視程計の代わりにならないか。

観測現業の定時観測後、予報官から空の雲の広がり具合を聞かれた。予報（モデル）と実況の整合性を確認する際に利用価値がありそう。

当初計画から変更した点（研究手法の変更点など）

通信データ量の圧縮に成功

- ・解析用の生データは、サイズが大きく、通信負荷が高いため、準リアルタイムで解析結果を公開することは困難と考えていた。しかし、データサイズを5分の1に圧縮することに成功したため、可能性が出てきた。これによってより高度な情報提供が可能となる。

雲の高度分布の定量化手法の高度化

- ・雲の移動ベクトルを導出可能となった。
- ・下層と上層の雲は、移動方向が異なる事もあり得る。
- ・高さのスカラー量だけでなく、情報量の多い移動ベクトルをもちいてカテゴリ化した方が、より良い高度分布の導出が可能かもしれない。

今後の課題

通信環境の悪化

- ・コロナ禍で通信需要が増加。このため、通信不通の頻度が増加。
- ・中断されたデータ転送は、最初からやり直しになるため、通信量が大幅に増加。
- ・月3GBの容量制限のプリペイドsimでは不足。
- ・今年購入予定だった月10GBのプリペイドsimは在庫切れ。
- ・コロナ禍の需要増により、新しく月30GBのプリペイドsimが発売。これによって解決の見込み。

カメラの劣化

- ・これまで約8ヶ月間、屋外で太陽直達光にさらしながら連続運用を実施してきた。
- ・暗いシーンで太陽の軌跡が目えるほど劣化が進んだ。
- ・交換費用は約30万円。今回は耐久性のテストを兼ねてこのまま続行。

来年度の研究計画の骨子

- ・R3年12月まで観測を継続。

- ・ R3 年前半までにプロダクト開発を行う。その後、目視データで検証。
- ・ 現業活用法の調査は、R3 年度後半まで継続し、まとめる。

研究成果リスト

(1) 査読論文 : 0 件

特になし

(2) 査読論文以外の著作物 (翻訳、著書、解説) : 0 件

特になし

(3) 学会等発表 : 0 件

特になし

沖縄地方の低周波地震の震源決定と発生状況等の調査

研究年次：1年目／2年計画（令和2年度～令和3年度）

研究代表者：水岸研二（沖縄気象台 地震火山課主任技術専門官）

研究担当者：

〔沖縄気象台〕川門義治、古謝秀和

〔地震津波研究部〕溜渕功史

研究の動機・背景

現在、気象庁では南海トラフ沿いの深部低周波地震やゆっくりすべりの監視を行い、南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会等の検討に利用している。また近年、南海トラフ沿いだけでなく、東北地方の日本海溝沿いなどでプレート境界の浅部で発生する浅部低周波地震（微動）やゆっくりすべりの研究が盛んに行われている。

しかし、沖縄地方のプレート境界付近で発生するゆっくりすべりや低周波地震活動については、振幅が小さいために気象庁では決定できていない状況である。琉球大学の中村教授は、気象庁の地震波形データを用いて、沖縄地方の低周波地震の震源を自動で決定し、研究材料として利用している。しかし、その事例は限られており、巨大地震を発生させるような固着域の有無は解明されていない。

当台では、令和元年度の地震火山部地震火山技術検討会の調査において、繰り返し相似地震の発生場所と中村教授が決定した低周波地震の発生場所が異なることなどを報告した。

このように、沖縄地方のプレート境界の固着状態を把握するための一つの方法として、低周波地震の活動状況を明らかにすることは重要である。そのため、浅部低周波地震を検出するための環境を構築し、方法の最適化を試行しながら検出作業を行う。

研究の目的

- ・気象庁が観測に使用している地震計の波形から低周波地震を検出し、その発生場所、発生時期、期間を求め、プレート境界の状況との関連性を調べる。

研究の目標

- ・低周波地震を自動で検出し、低周波地震と通常地震やゆっくりすべり地震との発生場所を明らかにすることにより、沖縄地方のプレート境界の固着状況解明に繋げる。

令和2年度の研究結果

研究の進捗状況及び成果

- ・低周波地震検出プログラムの環境を構築し、沖縄地方用に低周波地震の検出パラメータを調整し、低周波地震を検出した。
- ・2020年4月から2021年3月までに低周波地震活動1事例（ただし1事例中に低周波地震は複数回）を検出。手動で検測を行った結果、石垣島南方沖に震源が決まった。

今後の課題

- ・2020年4月以降、低周波地震活動を1事例しか検出できなかった。
- ・検出ツールの自動震源と手動検出した震源とで震央位置が異なっている。

対策として、

- ①波形フィルタのパラメータの調整
- ②検出ツールでの震源計算の妥当性の確認
- ③大学等他機関での低周波地震の検出手法を参考等を行う必要がある。

来年度の研究計画の骨子

- ・前年度に引き続き浅部低周波地震の検出プログラムを用いて沖縄地方の低周波地震の震源決定を行い、低周波地震の発生頻度、発生場所を確認する。
- ・繰り返し相似地震やゆっくりすべりと低周波地震の発生場所を比較する。

- ・低周波地震、ゆっくりすべり、繰り返し相似地震の活動状況の取りまとめを行う。

研究成果リスト

- (1) 査読論文：0件
特になし
- (2) 査読論文以外の著作物（翻訳、著書、解説）：0件
特になし
- (3) 学会等発表：0件
特になし

高精度な津波数値計算結果を用いた津波の地域特性の理解

研究年次：1年目／2年計画（令和2年度～令和3年度）

研究代表者：南 雅晃（地震津波研究部第四研究室）

研究担当者：

〔仙台管区気象台〕田中満幸、後藤 峻、藤田正義

〔大阪管区気象台〕新納孝寿、瀧本絵里香、佐藤悠弥、沼野あかね、小原久典、兵藤 守

〔高知地方気象台〕瀬戸博巳、川田敏弘

〔石垣島地方気象台〕石川 徹、宮城 健

研究の動機・背景

津波は発生すると広い範囲に影響を及ぼす現象であり津波予報区は概ね県単位に設定されているが、沿岸地形や海底地形の効果などにより局地的に津波が高くなることもあり、そのような場所では周辺に比べて被害が特に集中するようなことがあるため、個々の狭い範囲の地点での津波の正確な予測を行うこともまた重要である。

また、地方の気象官署においては、津波防災に関する啓発活動等を、各都道府県が実施する津波数値計算に基づくハザードマップ等を踏まえて行うことがあるが、個別具体の地点において高くなる低くなる原因などに言及するには、計算の具体的な中身まで理解するため、自らが計算の過程や詳細な結果を知っておく必要がある。

各地方において自らの地方に特化した解析を行うことによって、これまで明らかになっていなかった各地方に特化したそれぞれの地域の津波の特性を見出すことが期待されることから、今回の地方共同研究を行いたいと考えた。

研究の目的

各々の地方において観測されたり予測されたりしている周辺に比べて局地的に高い津波が、地形効果などその地域特有の現象であるのか、それともその他に原因があるのかを、様々な条件で行った津波数値計算を定量的に評価することにより、各地方における津波の地域特性を見いだす。加えて津波数値計算の精緻化による効果なども明らかにする。

研究の目標

各地域の津波の地域特性を把握するために、津波計算の各種パラメータ等を様々に変化させて計算を行う、さらに計算に用いる地形データの精緻化を行い計算を行うなどして、それらが計算結果に与えるインパクトを評価することを目標とする。

令和2年度の研究計画

対象とする津波事例を選定の後、津波数値計算を行う。担当する各地方の計算結果を解析する。各事例での、観測値や既往の計算結果との比較から精度の検証等を行う。

令和2年度の研究結果

研究の進捗状況及び成果

各々の官署で、1960年チリ地震津波(仙台)、想定南海トラフ地震(大阪)、昭和南海、安政南海、宝永地震(高知)、1986年台湾付近の地震(石垣島)の事例を選定した。それぞれについて既往研究との比較や、内閣府の南海トラフ地震の想定津波との比較、担当する府県内での計算値の違いの検証、歴史地震においては痕跡高との比較、さらには電子化されていない観測データを新たに読み取り波形の比較を試みるなど、各官署で様々な方法で精度の検証、解析を行った。

今後の課題

本年度は、解析用計算機の導入や、各官署での津波計算用ソフトウェアの習熟などに時間を要したため、計算、解析に充てられる時間が少なかった。そのためこれまでは各々の事例について、粗いメッシュでの計算結果の解析を行っている。今後は計算時間のかかる（多くの計算機資源を使う）詳細なメッシュでの計算などを行い、より精緻な解析を行う必要がある。

来年度の研究計画の骨子

すでに環境の整備、担当者の習熟は完了していることから、来年度はすぐに計算、解析にとりかかり、より計算時間のかかる詳細なメッシュでの計算し、今年度の結果との比較などを行う。さらに様々なパラメータを変えた計算を行い、局所的な津波を再現するために必要となる沿岸域のパラメータに関する知見の獲得を目指す。

研究成果リスト**(1) 査読論文：0件**

特になし

(2) 査読論文以外の著作物（翻訳、著書、解説）：3件

・藤田正義・後藤峻，JAGURSによるチリ地震津波の断層モデルの精度検証，令和2年度仙台管区調査研究会資料49～50ページ，仙台管区气象台。

・瀧本絵里香・佐藤悠弥・沼野あかね・兵藤守・小原久典，津波シミュレーションコード（JAGURS）を用いた大阪管内の津波特性調査，令和2年度大阪管区気象研究会誌，大阪管区气象台。

・瀬戸博巳・川田敏弘・三木洋介・新垣優治・岡野泰貴，JAGURSによる南海トラフで発生する地震の土佐湾沿岸での津波特性調査，令和2年度大阪管区気象研究会誌，大阪管区气象台。

(3) 学会等発表：0件

特になし

二重偏波レーダーを用いた火山噴煙の解析的研究

研究年次：1年目／3年計画（令和2年度～令和4年度）

研究代表者：佐藤英一（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、千馬竜太郎、五藤大仁、大賀昌一

研究の動機・背景

（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 レーダー網（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。

令和 2 年度の研究計画

- ・解析手法及び開発環境構築のための講習
- ・開発環境の構築
- ・先行研究（論文）を調査し、要点・着目すべきポイントをまとめる。
- ・解析事例の選定・解析

令和 2 年度の研究結果

研究の進捗状況及び成果

- ・5 月までに火山業務研修の業務教科書 2.4 レーダーを読み、レーダーの基礎や過去事例について、調査。二重偏波レーダーを用いた気象学の論文についても調査した。
- ・8 月 26 日鹿児島地方気象台にて、担当者向けに解説＋今後の方針について打合せを実施。
- ・11 月 16 日鹿児島地方気象台にて、概論＋他の研究計画との関係など解説。
- ・11 月 centOS6 のサポート切れに対応するため、OS の入れ替え作業を実施。
- ・解析事例は選定中。
- ・メールによるサポートは随時実施。

当初計画から変更した点（研究手法の変更点など）

- ・OS に入れ替えに際し、ノート PC（旧地方共同研究で購入）の動作が不安定となった。
- ・当初は既存のノート PC を使い続ける予定であったが、来年度、新規購入を検討。

今後の課題

- ・OS の更新に伴い、ソフトウェア（レーダー解析ソフトなど）の動作確認が必要。

来年度の研究計画の骨子

- ・引き続き、解析のための講習を行う予定。メール等によるサポートは随時行う。
- ・噴火事例の解析を行い、火山噴煙の二重偏波パラメータの変化傾向を掴む。

研究成果リスト

(1) 査読論文：0 件

特になし

(2) 査読論文以外の著作物（翻訳、著書、解説）：0 件

特になし

(3) 学会等発表：1件

1. 佐藤英一，瀧下恒星，井口正人，二次元ビデオディストロメーターによる降灰観測（初期解析結果），日本火山学会 2020 年度秋季大会, 2020 年 10 月, 日本

2. 3. 研究中間報告

本節には、気象研究所が令和2年度に中間評価を実施した経常研究について、課題毎に研究計画と研究成果等を掲載した。

2.3.1. 経常研究

- ・ 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・・・・・・・・・・・・・・・・ 133
- ・ 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・・・・・・・・ 158

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：2年目／5年計画（令和元年度～令和5年度）

研究代表者：青梨和正 気象観測研究部長（令和元年度）
瀬古 弘 気象観測研究部長（令和2年度）

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

〔気象観測研究部〕○岡本幸三、石橋俊之、近藤圭一、上清直隆（令和元年度）、小田真祐子（令和元年度）、石田春磨（令和2年度）、岡部いづみ（令和2年度）

〔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

〔気象観測研究部〕○川畑拓矢（令和2年度）、澤田謙、堀田大介、幾田泰醇（令和2年度）、

山田芳則（令和2年度）、瀬古弘（令和元年度）、藤田匡（令和元年度）、岡本幸三、小司禎教、酒井哲、吉田智、近藤圭一

〔台風・災害気象研究部〕荒木健太郎、小野耕介（令和2年度）

〔気象予報研究部〕藤田匡（令和2年度）

（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

〔気象観測研究部〕○石元裕史、山崎明宏、工藤玲

〔台風・災害気象研究部〕林昌宏

〔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

〔気象観測研究部〕○小司禎教、酒井哲、吉田智

〔台風・災害気象研究部〕永井智広

研究の動機・背景

（社会的背景・意義）

令和2年7月豪雨や平成30年7月豪雨、令和元年の台風15号や19号など、「今まで経験したことのない」という言葉で表現される顕著現象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、特に衛星観測データ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・研究機関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いて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）については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、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、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。メソアンサンブル予報の現業的利用が令和元年6月から開始された。数値予報課、大気海洋部予報課と航空予報室に、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」に対応する。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）

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）

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)**(a) 衛星データ同化の改良**

全天候域の赤外輝度温度同化や、陸域でのマイクロ波輝度温度同化の高精度化を開発し、全球同化システムを用いた評価を行う。ひまわり後継衛星搭載ハイパースペクトルサウンダの OSSE システムを構築し、数値予報精度への精度評価を行う。新規衛星 Aeolus による風データの同化を行うための、精度評価や前処理の開発を行う。放射伝達モデル RTTOV の雲・降水域での散乱特性について、他の高速放射伝達モデルを使うなどして調査する。

(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高精度の背景誤差共分散行列や初期値化手法を構築し、解析精度を評価する。観測誤差相関の考慮、水物質同化の高度化、境界付近の観測の同化手法の構築により、観測情報を拡充する。既存・将来観測のインパクト評価を行う。同化システムを用いた予報モデル誤差の推定・補正手法を構築する。

(副課題 2)**(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改良

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を行う。

(副課題 3)**(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量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)**(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。

中間評価時の到達目標

(副課題 1)

(a) 全天候域の赤外輝度温度同化や、陸域でのマイクロ波輝度温度同化の高精度化を開発し、全球同化システムを用いた評価を行う。ひまわり後継衛星搭載ハイパースペクトルサウンダの OSSE システムを構築し、数値予報精度への精度評価を行う。新規衛星 Aeolus による風データの同化を行うための、精度評価や前処理の開発を行う。放射伝達モデル RTTOV の雲・降水域での散乱特性について、他の高速放射伝達モデルを使うなどして調査する。

(b) アンサンブルを用いた高精度の背景誤差共分散行列や初期値化手法を構築し、解析精度を評価する。観測誤差相関の考慮、水物質同化の高度化、境界付近の観測の同化手法の構築により、観測情報を拡充する。既存・将来観測のインパクト評価を行う。同化システムを用いた予報モデル誤差の推定・補正手法を構築する。

(副課題 2)

(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

- ・現業システムに近いシステムや LETKF の改良や LETKF と 4DVar のハイブリッド手法の開発、非線形性・非ガウス性が卓越するシビア現象にも適用できる EnVar や粒子フィルタなどの開発を開始し、初期的な結果を得る。

- ・陸面などの結合同化の有効性を調べる。

(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

- ・ひまわりや偏波レーダー、フェーズドアレイレーダー、水蒸気ライダー等の高頻度・高密度な観測ビッグデータについての特性を調べ、最適なデータ間引き法や観測誤差相関を考慮した同化法等の検討を開始する。

- ・観測ビッグデータを用いて、より短いスピンアップで精度の良く予測するための同化手法を開発し、初期的な結果を得る。

- ・ハイパースペクトルサウンダ等の観測手法に資する観測システムシミュレーション実験を行う。

(c) 領域モデルを対象にしたアンサンブル予報と高度な利用法の開発

- ・アンサンブルによる感度解析法(予測に重要な物理量の抽出法)、シビア現象の確率予報や極端シナリオの抽出法などの高度なアンサンブル予報の利用法の開発を開始し、初期的な結果を得る。

- ・メソスケール現象のアンサンブル予報において、「全外し」時の特徴を調べる。

(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

(a) OCA のエーロゾル効果を改良する。また OCA を利用した混合相・過冷却水滴など雲物理情報抽出技術を開発する。晴天域不安定指数の推定アルゴリズムを開発する。

(b) 赤外サウンダシミュレータを開発する。サウンダデータを使った火山灰物質推定アルゴリズムを改良し、その結果をひまわり VOLCAT 解析用 LUT に反映させる。

(c) 内部混合エーロゾル、ぬれ雪粒子モデルの散乱特性データベースを構築し、その結果を用いた複合衛星データ解析を実施する。

(d) 研究年次計画のとおり、地上エー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、ならびに、放射計校正技術の開発を進める。また、全天カメラの開発を完了し、全天カメラ画像と分光放射計データを用いた雲の微物理及び光学特性の解析アルゴリズムの開発を進める。

(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

(a) 水蒸気ライダー

- ・水蒸気ライダーを用いた観測について、予測への効果を含めた装置の評価と課題をまとめるとともに、データ品質の管理手法を確立する。

(b) 船舶 GNSS

- ・2018 年度から開始した東シナ海を航行する船舶 8 隻に GNSS 機器を設置した水蒸気観測について、成果と課題をまとめる。

(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のプロトタイプについて評価を行い、特に豪雨の予測に資するか否かの観点でまとめを行う。

研究の現状

(1) 進捗状況

課題全体として、概ね計画どおり順調に進捗している。

副課題2では、事前評価(平成30年11月26日開催)時には、研究内容を「高度なアンサンブル予報の利用法や摂動作成法の高度化」としていたが、「高度なアンサンブル予報の利用法」については応用気象研究部が取り組み、副課題2では「アンサンブル摂動作成法の改良」に特化するという変更があった。副課題3では、本庁からの要望による「ひまわりOCA」を用いた日射量プロダクト・光合成有効放射(PAR)プロダクト開発・大気不安定指数の開発項目の追加、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT)の地上検証のためのつくば設置スカイラジオメータデータの国立環境研究所GOSAT地上検証グループへの提供等の変更がある。これらの「(3)当初計画からの変更点」がある副課題でも、概ね計画どおり進捗している。

令和2年度はコロナ禍の影響より、宮古島や南鳥島での大気放射やエアロゾル観測、長崎での水蒸気ライダー観測、東シナ海での船舶GNSS観測が遅れる懸念があったが、新規感染者数が減少した6月に観測機器の保守や観測を開始することができたため、令和3年1月現在、大きな遅れはない。

(2) これまで得られた成果の概要

(全体)

「3. 研究の目標」の項目順で記述する。詳細は副課題1～4を参照して頂きたい。

- ・「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」(副課題1, 2)について、以下の研究開発を行った。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行い、完全に流れ依存した背景誤差、観測誤差相関の導入による顕著な精度改善が得られることを示した。雷光の観測演算子を実装し、数値予報モデルを用いて雷光予測を行った。さらにLETKFを用いた同化システムで、非ガウス性が強い格子について観測誤差を膨張させる手法、粒子フィルタを適用する手法を開発した。初期値から予報開始直後に降水が過剰になるスピンドアウン問題について、変分法の評価関数に水蒸気分布に関する拘束条件を課すことにより、過剰の降水が軽減できることを示した。高頻度・高密度の観測データを適切な同化手法の開発として、ドップララーレーダーの動径風に注目し、同化時に用いる観測誤差をより精緻に与える手法を提案し、インパクトの事例調査を行った。
- ・「アンサンブル予報技術の開発」(副課題1, 2)について、1000メンバーの大アンサンブルLETKFを行い、令和2年7月豪雨の事例で線状降水帯の降水強度および確率予測の精度が良くなることを示した。アンサンブルを用いた変分法において、必須となる局所化手法の高度化、特に背景誤差共分散の時間発展の研究を進めている。
- ・「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」(副課題1, 3)として、全天候輝度温度データの同化に向けて雲の効果を考慮した品質管理や観測誤差モデルを開発した。それを放射伝達モデルRTTOV(高速放射伝達モデル)やJoint-Simulator(衛星シミュレータ)と比較し、差の原因について詳細に調査した。晴天輝度温度データについて、大気下層の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った。最適雲解析(OCA)プロダクトを用いた日射量プロダクトの開発を実施し、地上気象観測等との比較を行った。火山灰雲も独自アルゴリズムを開発し、VOLCATリトリーバル結果との整合していること、火山灰物質情報(複素屈折率)を抽出可能であることがわかった。
- ・「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3)については、本課題で開発した全天カメラの観測データから三次元放射伝達モデルを用いて全天空の輝度分布を定量化し、不均質に分布した雲の光学特性を導出する手法を開発した。また、新型全天カメラによる短い時間差の2枚の画像から、疑似ステレオ撮影により、雲の高度分布を導出する手法のプロトタイプを開発した。
- ・「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)については、2019年暖候期に関東平野で、2020年から長崎市野母崎と鹿児島県下甕島で水蒸気ライダー観測を開始した。2017年8月30日の東京都北部で発生した降水事例で水蒸気ライダーの水蒸気量の鉛直プロファイルの同化実験を行い、ライダーの下流側に位置する降水域で下層の水蒸気の量増加や収束強化が確認された。船舶搭載GNSSも観測を通年実施し、連続観測に耐えることを確認した。高層ゾンデや衛

星搭載マイクロ波放射計を比較して、平均差 1mm 未満、差の標準偏差 3mm 未満の一致を得た。

(副課題 1)

(a) 衛星データ同化の改良

- ・全天候ひまわり輝度温度同化、陸域影響下等の同化

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、OSSE を実行するための全体設計、疑似真値場作成や疑似観測値作成検討、気象庁全球およびメソデータ同化処理の開発・検証を行った。

ひまわり 8 号の全天候輝度温度データの同化に向けて、雲の効果を考慮した品質管理や観測誤差モデルを開発した。気象研全球 NAPEX に導入し、同化実験・検証を進めている。また全天候輝度温度の再現性を調べるため、放射伝達モデル RTTOV (高速放射伝達モデル) や Joint-Simulator (衛星シミュレータ) と観測との比較や差の原因について詳細に調査した。また晴天輝度温度データについても、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、検証を行っている。

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) を開発し、気象研全球 NAPEX に導入し検証した。さらに DE が適切に適用できる条件を調査し、品質管理処理を開発している。

- ・新規衛星の同化、ひまわり後継 OSSE 関連

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、同化処理の開発・改良、OSSE を実施している。さらに DWL を搭載した新規衛星 Aeolus が観測する実データを取得し、品質評価・同化実験を開始した。

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、主成分スコアを同化するための基礎調査や同化処理の開発を開始した。

(b) 全球データ同化システムの改良

- ・気象研全球 NAPEX について、気象研究所計算機システムの更新 (R1.3) に対応した移植作業と、本庁システムの更新への対応を行った。
- ・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 上で進めており、完全に流れ依存した背景誤差、観測誤差相関の導入により顕著な精度改善が得られた。
- ・水物質の情報をもつ観測の高度利用のため、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解析した。また、これを同化で使用するために同化システムの拡張を行った。
- ・積乱雲深層の情報をもつ雷光観測の同化のために、雷光の観測演算子を実装し、数値予報モデルによる雷光予測を行った。また、雷光の疑似観測を同化し、気象場へのインパクトを調べた。
- ・感度解析を応用して超高精度な解析場 (真値代替場) を高解像度 (水平 20km、鉛直 100 層) で夏冬一ヶ月の期間で作成した。OSSE の真値代替場としても利用した。
- ・同化された観測の解析や予報場へのインパクトを評価した。CriS (赤外ハイパースペクトルサウンダ) 等の新規センサのインパクトが明瞭に見られることや、誤差共分散行列への依存性が強いこと等が解析された。
- ・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、海面水温解析を大気解析と同時に進行するように大気解析を拡張し、初期試験を行った。
- ・観測データの選択によってアンサンブル生成を行うシステムを構築し、予報精度が明瞭に向上することを示した。
- ・アンサンブルを用いた変分法において、背景誤差共分散のノイズを取り除くためマルチスケールの局所化を簡易的なモデルに実装して研究を進めた。
- ・背景誤差の非ガウス分布について、簡易モデルを用いたアンサンブルカルマンフィルタによるデータ同化実験から、背景誤差は多くの格子点でガウス分布であるものの、非線形性が強い場合は解析誤差が大きくなる傾向があることを示した。さらに非ガウス性の強度に応じて観測誤差を膨張させる手法の開発を開始した。

(副課題 2)

(a) シベア現象に適用する高解像度非線形同化システムの開発

- ・データ同化による非現実的な水蒸気分布に起因する降水予報のスピンダウン問題について、変分法の枠組みで水蒸気分布に関する拘束条件を評価関数に適切に与えることで、スピンダウンの状態が軽減できることを示した。
 - ・アンサンブル同化システムにおいて、同化データが非常に多すぎる場合に予報精度が十分に改善できない問題について、観測数よりアンサンブルメンバー数を増やすことがより有効に予報を改善させることを示した。
 - ・非線形・非ガウスを陽に扱う手法として粒子フィルタを開発し、積乱雲のカオス性の起源を調べたところ、積雲発生前の上昇流から始まっていることがわかった。
- (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
- ・ドップラーレーダーの動径風について、時空間相関を考慮した観測誤差を用いて高頻度高密度観測の効果をより有効に引き出すためには「流れに依存する背景誤差」を考慮した同化手法が望ましいことがわかった。
 - ・船舶搭載 GNSS で観測した可降水量について、気象研メソスケール大気データ同化実験システムを用いて、降水分布が改善する事例があることを確認した。
 - ・気象研究所や関西国際空港のドップラーレーダーの位相データを用いて遅延量(T4 課題から提供)の時間変化が明瞭に見えることを確認した。屈折率の時間変化量と GNSS データに対して同化実験を行った。大阪平野で発生した局地的大雨の場合、屈折率の時間変化量のインパクトはGNSS よりも小さいことがわかった。
 - ・次期衛星の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、OSSE を行い、平成 30 年 7 月豪雨についてサウンダによる観測で得られると想定される温度や湿度の鉛直分布が豪雨の降水予報を改善することを示した。
 - ・非ガウス分布する高次元データをガウス分布する低次元データに変換できる技術を AI アルゴリズムを用いて開発し、その有効性を確認した。
 - ・ライダー品質管理に関して理化学研究所との共同研究の下、AI を用いたノイズ除去手法を開発し、従来手法と同等の精度を得ることができた。
 - ・アンサンブルから作成した仮想空間を利用して AI を用いたモデルパラメータの効率的に最適な推定を行う手法を試み、想定通りの結果を得ることが出来た。
- (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
- ・平成 30 年の 7 月豪雨と平成 29 年の九州北部豪雨について特異値解析を行い、西日本の降水量に対する大気場の異質相関マップを求めた。異質相関マップから摂動を作成して予報すると、期待したように降水域の位置が変化することを確認した。
 - ・1000 メンバーによる大アンサンブル LETKF によって、令和 2 年 7 月豪雨における線状降水帯に対して降水強度および確率予測を精度良く行えることを示した。

(副課題 3)

- (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
- ・最適雲解析 (OCA) プロダクトを用いてひまわり 8 号観測データによる日射量プロダクトの開発を行った。また、日射量プロダクト作成技術を応用して PAR プロダクトの開発を行っている。
- (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
- ・OCA 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。噴火事例解析を開始し、火山灰物質情報の依存性について調査している。
 - ・火山灰雲パラメータ (雲頂高度・粒子有効半径・光学的厚さ) や SO₂ カラム量と同時に火山灰複素屈折率を推定する赤外サウンダ用高速スペクトルシミュレータを新たに開発した。
- (c) 大気・地表面放射モデルの改良
- ・マイクロ CT (断層撮影法) データから詳細な霰・雪片の 3 次元形状を抽出し、C バンドレーダー偏波特性の理論計算を行った。
 - ・地上可搬型全天分光日射計データから積雪粒径を導出するために必要な積雪粒子形状モデルを開発した。
 - ・積雪の波長別偏光特性を調べるための大気-積雪放射伝達モデルを開発した。
 - ・A-Train の衛星搭載イメージャとライダーを複合利用し、水溶性・黒色炭素・ダスト・海塩のエアロゾル組成の全球三次元分布を導出する手法を開発している。AERONET の分光放射計による検証、放射強制力の見積りを行ったところ、他の研究と整合的な結果が得られた。

・JAXA 公式プロダクトとして、次世代衛星 EarthCARE 搭載イメージャとライダーからエアロゾル組成を導出する手法を開発している。準リアルタイム解析のため、放射伝達モデルを並列化し、高速化を果たした。またプロダクトの不確定性を評価した。

・上記衛星データ解析手法を、火山噴火に応用することを目的に、火山灰の粒子モデルを作成した。

(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

・技術開発

光源を太陽光・月光とするスカイラジオメータの開発を進め、ドイツで行われた月と星を光源とした分光日射計の国際的な比較観測に参加した。

スカイラジオメータ観測からエアロゾルの微物理・光学特性、可降水量、オゾン全量を導出する手法を開発。ヨーロッパの研究グループの協力を得て、航空機による比較検証も行い、結果を論文に投稿した。ソフトウェアは、大気海洋部環境・海洋気象課、SKYNET コミュニティに提供し、一部では結果が公開されている。

全天空の輝度分布を定量化する新型全天カメラの観測データから三次元放射伝達モデルを用いて、不均質に分布した雲の光学特性を導出する手法を開発した。スカイラジオメータや日射の地上観測プロダクト、ひまわりや GCOM の衛星プロダクトとの相互比較検証を行い、概ね整合的な結果が得られること確認した。

新型全天カメラによる短い時間差の画像から、疑似ステレオ撮影により、雲の高度分布を導出する手法のプロトタイプを開発した。

高層気象台と協力し、太陽直達光と散乱光を紫外から近赤外波長までを高分解能で測定する分光放射計から、エアロゾル組成を推定する手法のプロトタイプを開発した。

・観測

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を行った。また、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。

2020 年 8 月上旬に九州、沖縄地方に到達したとみられる西之島の火山起源の煙霧について、8 月 5 日沖縄（宮古島）で、8 月 6 日に福岡でスカイラジオメータ等を用いて捉えることができた。

(副課題 4)

(a) 水蒸気ライダー

・技術開発

水蒸気差分吸収ライダー(DIAL)の初期観測を 2020 年 9~11 月に気象研露場で実施し、その観測精度検証に着手した。

AI を用いた水蒸気ラマンライダー観測データの品質管理手法および混合層高度検出手法の開発に着手し、Deep Image Prior (ニューラルネットワーク構造を利用した画像復元手法の一つ) を用いたノイズ除去を行った結果、ゾンデデータとの RMSE が 3.2g/kg から 1.9g/kg に改善した。

・観測

インパクト評価実験に用いるために、水蒸気ラマンライダーを用いた観測を 2019 年暖候期に東京湾岸（川崎市・茅ヶ崎市）とつくばで実施し、期間中ほぼ連続的に水蒸気鉛直分布を、日中高度 0.1~約 1 km, 夜間 0.1~約 5 km の範囲で取得した。

福岡大学及び防災科学技術研究所との共同研究で、2020 年から長崎市野母崎(6/19)および鹿児島県薩摩川内市下甕島(8/29)において水蒸気ラマンライダー観測を開始した。2020 年 6 月 25 日に長崎県北部で発生した線状降水帯事例に関連した大気下層における水蒸気鉛直構造時間変化の観測に成功した。

・同化実験

2017 年 8 月 30 日の東京都北部で発生した降水事例に対して、川崎市に設置した水蒸気ラマンライダーで得られた水蒸気鉛直プロファイルのデータ同化実験を行った。

水蒸気鉛直プロファイルの同化により、水蒸気ラマンライダーの下流側に位置する降水域で、下層水蒸気量増加および収束強化のインパクトが確認された。2017 年 7 月の九州北部豪雨事例を用いて、水蒸気ライダーや GNSS の OSSE に着手した。

・現象解析

2017 年 8 月 19 日の東京での局地的大雨事例について、水蒸気ラマンライダー及び空港気象ドップラーライダー観測データと気象庁非静力学モデル(NHM)による再現実験結果を解析し、東京湾か

ら上陸する海風前線が、16 時過ぎに武蔵野市付近で降水をもたらした積乱雲発生トリガとなっていることを明らかにした。

2018 年 9 月 2 日に羽田空港周辺で発生した積乱雲の発生・発達過程を羽田空港ドップラーライダー及び空港ドップラーレーダーで明瞭に捉えることに成功した。水蒸気ラマンライダー観測で得た水蒸気の鉛直プロファイルとの比較から、下層水蒸気量の上昇により積乱雲の発達が強化されていることを示した。

(b) 船舶 GNSS

・船舶搭載 GNSS による観測を通年実施し、連続観測に耐えることを確認した。解析された可降水量解析と高層ゾンデや衛星搭載マイクロ波放射計を比較し、平均差 1mm 未満、差の標準偏差 3mm 未満の一致度を得た。

・船舶搭載 GNSS の位置推定誤差が可降水量の誤差と関連していることを発見した。また潮汐モデルを用いることで誤差を軽減できる可能性があることを確認した。

(c) 水蒸気の時・空間構造解析

・3 次元変分法による高頻度地上観測データ同化により、夏季東京の平均的な大気構造の日変化、及び豪雨の環境場の解析を行った。

・首都圏に 70mm/h 以上の短時間強雨が発生する場合、鹿島灘からの北東風と東京湾からの南東風が収束する場合が多いこと、また豪雨となる場合は鹿島灘からの北東風は下層で多湿であることがわかった。

(3) 当初計画からの変更点 (研究手法の変更点等)

(副課題 1)

変更なし。

(副課題 2)

事前評価時 (平成 30 年 11 月) には、研究内容を「高度なアンサンブル予報の利用法や摂動作成法の高度化」としていたが、「高度なアンサンブル予報の利用法」については応用気象研究部が行うこととし、副課題 2 では「アンサンブル摂動作成法の改良」に特化することとした。「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」を取りやめにした。

(副課題 3)

ひまわり OCA を用いた日射量プロダクト・PAR プロダクト開発・大気不安定指数は気象庁からの要望を受けた形で研究計画に追加した。温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT) の地上検証を行うため、2009 年から 2018 年にかけてのつくば設置スカイラジオメータから導出した光学的厚さ、一次散乱アルベドのデータを国立環境研究所 GOSAT 地上検証グループに提供した。

(副課題 4)

変更なし。

(4) 成果の他の研究への波及状況

(副課題 1)

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なっている。また、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おり、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。

(副課題 2)

NHM-LETKF を用いたアンサンブル同化システムは、「ポスト『京』」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関するアプリケーション開発・研究開発、重点課題④「観測ビッグデータを活用した気象と地球環境の予測の高度化」や「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。また 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。

(副課題 3)

スカイラジオメータについて、開発したエーロゾル解析ソフトウェアを大気海洋部環境・海洋気象課に提供し、解析に関する助言を行った。今後の現業運用を予定している。またスカイラジオメータの国際コミュニティ (SKYET) にも提供し、一部導入を果たしている。地方共同研究の枠組みで開発した新型全天カメラを大阪管区気象台に導入し、令和 3 年 12 月までの観測を予定している。現業活用を目指している。JAXA と千葉大学、山梨大学で共同開発していた GOSAT シリーズの地上検証用の分光測器のベースデザインに、本課題で開発した全天カメラによる輝度分布測定手法を取り入れられている。A-Train の衛星搭載ライダー (CALIOP) を使ったエーロゾルリトリーバル手法を、JAXA/EORC で運用している A-Train プロダクト解析・公開システムへ導入することになった。現在、導入に向けた作業中。

(副課題 4)

大気海洋部地球環境海洋部における凌風丸代船検討において、GNSS 水蒸気観測システムの導入が検討されるとともに、啓風丸への導入も検討されている。気象庁の GNSS 水蒸気解析システムで使用しているリアルタイム軌道情報 (MADCOA) の代替検討に成果が利用されている。

(5) 事前評価の結果の研究への反映状況

事前評価にいただいた「大気相互作用、雲、放射に加えてエーロゾルも加えるべき」、「フォワードでモデルと比較した細かいプロセススタディーも行うべき」というご意見を反映し、エーロゾル粒子モデルの開発・改良、エーロゾル・雲等の推定技術の開発、大気放射場の変動とその要因の監視技術を高度化に取り組んでいる。(副課題 3)

「水蒸気の時空間変動はきわめて大きく、それをどのように観測するのかについての検討が必要」というご意見については、まだ解決していないが、例えば線状降水帯の観測については、「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」(T 課題) とも連携しながら、OSSE の実施など、水蒸気流入の空間スケールに応じた観測密度の検討を行っている。

今後の研究の進め方

(1) 「進捗状況」で述べたように、課題全体として概ね計画どお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)

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る。特に陸域での輝度温度データ同化手法の高度化や新規衛星 Aeolus による風データの利用、ハイパースペクトル赤外サウンダデータの利用、ひまわり 8 号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は、現業数値予報システムへの導入を予定しており、数値予報課との連携を強化する。ひまわり後継衛星を始めとする将来の観測システムを検討するための OSSE は、本庁や JAXA 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い、さらに発展させる。

(副課題 2)

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については、ハイブリッド 4D-Var や粒子フィルタ (LETKF とのハイブリッドを含む) の開発を進めていく。さらにこれらが特に非線形・非ガウスとなる強雨時に有効であることを確認する。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では、観測ビッグデータにおける誤差相関を陽に考慮し、その効果を発揮するためにウェーブレット空間に定義する制御変数の導入などさらなる開発を続けていく。また非ガウス性の強い観測データの同化手法として AI による手法を試みる。さらに様々な先端的観測データの予測へのインパクトを調査し、その有用性を確認する。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では、1000 メンバーのような大アンサンブル実験によって得られるアンサンブルスプレッドなどを参照として、より高度な摂動作成法を開発していく。

(副課題3)

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の火山灰雲解析を実施する。氷晶や積雪粒子の形状やそれらによる光散乱特性を解析する手法を開発し、ひまわり等の衛星データ解析アルゴリズムに取り入れる。また新しい霰形状モデルを用いた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)

引き続き令和4年度まで、水蒸気ライダーは第2期SIP予算、船舶GNSS観測は科研費課題で観測を行う。観測データを副課題2に提供するとともに、データ同化実験を行い、線状降水帯等の豪雨予測の改善を目指す。また、次世代型の水蒸気ライダー技術であるDIALの開発を進める。船舶搭載GNSS観測では、システムの小型化を検討するとともに、波浪計や海面高度計としての利用可能性を検討する。

自己点検**(1) 到達目標に対する進捗度****(副課題1)****(a) 衛星データ同化の改良**

全天候域の赤外輝度温度同化や、陸域でのマイクロ波輝度温度同化の高精度化を開発し、全球同化システムを用いた評価を行った。ひまわり後継衛星搭載ハイパースペクトルサウンダのOSSEシステムを構築し、数値予報精度への精度評価を行い、論文を刊行した。新規衛星Aeolusによる風データの同化を行うための、精度評価や前処理の開発を行った。また、放射伝達モデルRTTOVの雲・降水域での散乱特性についても、他の高速放射伝達モデルを使うなどして調査している。衛星データ同化に関して、概ね計画通り進捗している。

(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を開発して気象研全球NAPEX上で進めており、完全に流れ依存した背景誤差や観測誤差相関の導入による顕著な予報精度改善が得られている。観測誤差相関の考慮、水物質同化の高度化、境界付近の観測の同化手法の構築によって観測情報を拡充し、既存・将来観測のインパクト評価を行った。モデル予測の系統誤差の軽減や境界付近の観測の高度利用の為に大気解析と海面水温解析を同時に行う研究を進めた。また、アンサンブルを用いた背景誤差共分散のノイズを取り除くため、マルチスケールの局所化を簡易モデルに実装して研究を進めた。背景誤差の非ガウス分布について、簡易モデルを用いたアンサンブルカルマンフィルタによるデータ同化実験から、背景誤差は多くの格子点でガウス分布であるものの、非線形性が強い熱帯やストームトラックでは非ガウス性が強くなり、解析誤差が大きくなる傾向があることを示した。これまでに得られた成果にあるように、全球データ同化手法の高度化についても、概ね計画通り進捗している。

(副課題2)**(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**

現業システムに近いシステム、LETKFの改良やハイブリッド4D-Varの開発、非線形性・非ガウス性が卓越するシンビア現象にも適用できるEnVar(アンサンブル変分法)や粒子フィルタなどの開発を開始し、初期的な結果を得ている。概ね計画通り進捗している。

(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

ひまわりや偏波レーダー、フェーズドアレイレーダー、水蒸気ライダー等の高頻度・高密度な観測ビッグデータについての特性を調べ、AIを用いた間引き法や観測誤差相関を考慮した同化法等の検討を開始した。また、初期値の水蒸気のアンバランスで起きるスピンドアウンの影響を小さくするための同化手法を開発し、初期的な結果を得て、論文にまとめている。ハイパースペクトルサウンダ等の観測手法に資するOSSEを行って、論文にまとめている。このように、概ね計画通り進捗している。

(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改良

アンサンブルによる感度解析法（予測に重要な物理量の抽出法）、シビア現象の確率予報や極端シナリオの抽出法などの高度なアンサンブル予報の利用法については、事前評価後の研究計画変更により研究対象になっていない。メソアンサンブル予報の初期摂動の改良において、令和2年7月豪雨の1000メンバーのアンサンブル実験を行って降水予報の改善を示し、初期摂動の改良のための知見を得た。概ね計画通り進捗している。

（副課題3）

(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

OCAのエーロゾル効果を改良し、OCAを利用した混合相・過冷却水滴など雲物理情報抽出技術を開発した。晴天域不安定指数の推定アルゴリズムを開発した。

(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

赤外サウンダシミュレータを開発する。サウンダデータを使った火山灰物質推定アルゴリズムを改良し、その結果をひまわりVOLCAT解析用LUTに反映させている。

(c) 大気・地表面放射モデルの改良

衛星搭載ライダー・イメージャの複合利用法の開発について、現行・次世代衛星ともに計画通り実施した。現行衛星の解析手法については、JAXA/EORCの解析・公開システムに導入されることが決まり、計画以上の成果を上げている。

(d) 大気放射収支の変動及びエーロゾル・雲の監視技術の高度化

スカイラジオメータ、全天カメラ、分光放射計を使ったエーロゾル・雲・放射のリモートセンシング手法の開発について、計画通りに実施した。スカイラジオメータの解析手法については、大気海洋部環境・海洋気象課、SKYNETコミュニティへの導入が進み、計画以上の成果を上げている。研究年次計画のとおり、地上エー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進めた。

これらのように (a) から (d) において、概ね計画通り進捗している。

（副課題4）

(a) 水蒸気ライダー

水蒸気ライダーを用いた観測について、コロナ禍の感染者数が少なくなった6月に観測を開始し、現在も順調にデータを得ている。また、予測への効果を含めた装置の評価と課題を論文にまとめるとともに、データ品質の管理手法を確立した。概ね計画通り進捗している。

(b) 船舶GNSS

東シナ海を航行する船舶8隻にGNSS機器を設置した水蒸気観測について、令和2年7月豪雨期間中を含め、順調に観測データを得ることができた。これらの成果と船舶という移動体で観測しながら精度を保持するための方策を学会等で発表するとともに、論文にまとめている。概ね計画通り進捗している。

(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のプロトタイプについて評価を行い、特に豪雨の予測に資するか否かの観点で、論文にまとめている。概ね計画通り進捗している。

（2）到達目標の設定の妥当性

「(1) 到達目標に対する進捗度」で示したように、ほとんどの副課題の項目で中間目標にほぼ到達しており、研究計画開始時に設定した到達目標は妥当と考えている。

（3）研究の効率性（実施体制、研究手法等）

気象研究所が所有する研究施設や観測測器（大型計算機、スカイラジオメータ、水蒸気ライダー、GNSS受信機等）を活用して研究を行うことにより、効率的に研究開発を進めることができている。また、副課題1と2の間での「データ同化手法に関する知見の共有」、副課題1と3の間での「大気放射に関する知見の共有」、副課題2と4の間での「水蒸気データの提供や知見の共有」など、副課題間の連携が適切に行われている。他の課題との連携について、アンサンブルデータについては、T課題をはじめとする他の研究課題とも知見の共有を進めてきたほか、新規観測データの同化手法等で基盤情報部数値予報課とも適時の情報交換を行い、必要に応じて現業システムの活用を図るなど、連携を強めてきた。第2期SIP「線状降水帯観測・予測システム」や「富岳」プロジェクト、科研費など外部

資金の活用や他機関との協力により遂行している。以上から、研究効率性（実施体制、研究手法等）は妥当と考えている。

（４）成果の施策への活用・学術的意義

本研究で得られた開発された「データ同化手法」、「大気放射やエアロゾル、水蒸気に観測に関する知見」は、現業数値予報モデルのデータ同化手法の高度化や新規観測データの導入の際に参考となるものであり、同時に学術的な意義も大きい。船舶 GNSS が令和 3 気象庁概算要求に取り入れられた。水蒸気ライダーは第二期 SIP 課題において、主要な水蒸気観測手段として位置づけられている。得られた成果は線状降水帯等災害をもたらす豪雨のメカニズム解明に必要な情報を提供する。また、通年のモニタリング観測で作成したエアロゾルのデータベースは、広くエアロゾル研究の基盤として有用なものである。本課題で得られた成果の学術的意義は、査読付き論文（共著含む）37 本、査読なし論文や解説 16 本、学会発表 119 件という数にも表れている。

（５）総合評価

本研究課題が掲げる目標が達成されれば、「データ同化技術の高度化」、「大気放射やエアロゾル、水蒸気量の観測の高精度化」により、現業数値予報の予測精度向上を通じて防災情報が改善され、国民の安全・安心に結び付く。水蒸気量やエアロゾルの観測データには、顕著現象や気候変動の理解に基づく監視・予報作業に活かされるものである。また、いずれの研究も日本における気象学の進展に貢献するものである。したがって、本研究に継続して取り組む意義は高い。加えて、多数の論文発表等に見られる通り、学術的にも価値の高い成果が数多く得られており、その点においても本研究課題を着実に進める必要がある。

研究成果リスト

（１）査読付原著論文：37 件

1. Le Duc, T. Kawabata, K. Saito, T. Oizumi, 2021: Forecasts of the July 2020 Kyushu Heavy Rain Using a 1000-Member Ensemble Kalman Filter. *SOLA*, **17**, 41-47.
2. Hotta, D., and Y. Ota, 2021: Why does EnKF suffer from analysis overconfidence? - An insight into exploiting the ever-increasing volume of observations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **147**, 1258-1277.
3. Le Duc, K, Saito, and D. Hotta, 2020: Analysis and design of covariance inflation methods using inflation functions. Part 1: Theoretical framework. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146**, 3638-3660.
4. Okamoto, H., K. Sato, A. Borovoi, H. Ishimoto, K. Masuda, A. Konoshonkin, and N. Kustova, 2020: Wavelength dependence of ice cloud backscatter properties for space-borne polarization lidar applications. *Optics Express*, **28**, 29178.
5. Okamoto, K., H. Owada, T. Fujita, M. Kazumori, M. Otsuka, H. Seko, Y. Ota, N. Uekiyo, H. Ishimoto, M. Hayashi, H. Ishida, A. Ando, M. Takahashi, K. Bessho, and H. Yokota, 2020: Assessment of the potential impact of a hyperspectral infrared sounder on the Himawari follow-on geostationary satellite. *SOLA*, **16**, 162-168.
6. Li, W., F. Zhang, YI-N. Shi, H. Iwabuchi, M. Zhu, J. Li., W. Han, H. Letu, and H. Ishimoto, 2020: Efficient radiative transfer model for thermal infrared brightness temperature simulation in cloudy atmospheres. *Optics Express*, **28**, 25730.
7. Nakajima, T., M. Campanelli, H. Che, V. Estelles, H. Irie, S. Kim, J. Kim, D. Liu, T. Nishizawa, G. Pandithurai, V. Soni, B. Thanu, N. Tugjurn, K. Aoki, S. Go, M. Hashimoto, A. Higurashi, S. Kazadzis, P. Khatiri, R. Kudo, A. Yamazaki, and 6 others., 2020: An overview of and issues with sky radiometer technology and SKYNET. *Atmospheric Measurement Techniques*, **13**, 4195-4218.
8. Tanikawa, T., K. Kuchiki, T. Aoki, H. Ishimoto, A. Hachikubo, M. Niwano, M. Hosaka, S. Matoba, Y. Kodama, Y. Iwata, and K. Stamnes, 2020: Effects of snow grain shape and mixing state of snow impurity on retrieval of snow physical parameters from

- ground-based optical instrument. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, **125**, e2019JD031858.
9. Ishibashi, T., 2020: Improvement of accuracy of global numerical weather prediction using refined error covariance matrices. *Monthly Weather Review*, **148**, 2623-2643.
 10. Momoi, M., R. Kudo, K. Aoki, T. Mori, K. Miura, H. Okamoto, H. Irie, Y. Shoji, A. Uchiyama, O. Ijima, M. Takano, and T. Nakajima, 2020: Development of on-site self-calibration and retrieval methods for sky-radiometer observations of precipitable water vapor. *Atmospheric Measurement Techniques*, **13**, 2635-2658.
 11. Jiang, Z., M. Duan, H. Che, W. Zhang, T. Nakajima, M. Hashimoto, B. Chen, and A. Yamazaki, 2020: Inter-comparison between the Aerosol Optical Properties Retrieved by Different Inversion Methods from SKYNET Sky Radiometer Observations over Qionghai and Yucheng in China. *Atmospheric Measurement Techniques*, **13**, 1195-1212.
 12. Okamoto, K., Y. Sawada, and M. Kunii, 2020: Comparison of assimilating all-sky and clear-sky infrared radiances from Himawari-8 in a mesoscale system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **145**, 745-766.
 13. Letu, H., K. Yang, T. Y. Nakajima, H. Ishimoto, T. M. Nagao, J. Riedi, A. J. Baran, R. Ma, T. Wang, H. Shang, P. Khatrri, L. Chen, C. Shi, and J. Shi, 2020: High-resolution retrieval of cloud microphysical properties and surface solar radiation using Himawari-8/AHI next-generation geostationary satellite. *Remote Sensing of Environment*, **239**, 111583.
 14. S. Yoshida, S. Yokota, H. Seko, T. Sakai, T. Nagai, 2020: Observation System Simulation Experiments of Water Vapor Profiles Observed by Raman Lidar using LETKF System. *SOLA*, **16**, 43-50.
 15. Kawabata, T., and G. Ueno, 2020: Non-Gaussian Probability Densities of Convection Initiation and Development Investigated Using a Particle Filter with a Storm-Scale Numerical Weather Prediction Model. *Monthly Weather Review*, **148**, 3-20.
 16. Le Duc, K. Saito, D. Hotta, 2020: An Explanation for the Diagonally Predominant Property of the Positive Symmetric Ensemble Transform Matrix. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **98**, 455-462.
 17. Uchiyama, A., M. Shiobara, H. Kobayashi, T. Matsunaga, A. Yamazaki, K. Inei, K. Kawai, and Y. Watanabe, 2019: Nocturnal aerosol optical depth measurements with modified sky radiometer POM-02 using the moon as a light source. *Atmospheric Measurement Techniques*, **12**, 6465-6488.
 18. Okamoto, H., K. Sato, A. Borovoi, H. Ishimono, K. Masuda, A. Konoshonkin, N. Kustova, 2019: Interpretation of lidar ratio and depolarization ratio of ice clouds using spaceborne high-spectral-resolution polarization lidar. *Optics Express*, **27**, 36587-36600.
 19. Bagtasa, G., M. G. Cayetano, C.-S. Yuan, O. Uchino, T. Sakai, T. Izumi, I. Morino, T. Nagai, R. C. Macatangay, and V. A. Velazco, 2019: Long-range transport of aerosols from East and Southeast Asia to northern Philippines and its direct radiative forcing effect. *Atmospheric Environment*, **218**, 1352-2310.
 20. Khatrri, P., H. Iwabuchi, T. Hayasaka, H. Irie, T. Takamura, A. Yamazaki, A. Damiani, H. Letu, and Q. Kai, 2019: Retrieval of cloud properties from spectral zenith radiances observed by sky radiometers. *Atmospheric Measurement Techniques*, **12**, 6037-6047.
 21. Masuda, R, H. Iwabuchi, K. S. Schmidt, A. Damiani, and R. Kudo, 2019: Retrieval of cloud optical thickness from sky-view camera images using a deep convolutional neural network based on three-dimensional radiative transfer. *Remote Sensing*, **11**.

22. Kondo, K., and T. Miyoshi, 2019: Non-Gaussian statistics in global atmospheric dynamics: a study with a 10240-member ensemble Kalman filter using an intermediate atmospheric general circulation model. *Nonlinear Processes in Geophysics*, **26**, 211-225.
23. Ujiie, M. and D. Hotta, 2019: Elimination of spectral blocking by ensuring rotation-free property of discretised pressure gradient within a spectral semi-implicit semi-Lagrangian global atmospheric model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **145**, 3351-3358.
24. Nakajima T., H. Ishida, T. M. Nagao, M. Hori, H. Letu, R. Higuchi, N. Tamaru, N. Imoto, and A. Yamazaki, 2019: Theoretical basis of the algorithms and early phase results of the GCOM-C (Shikisai) SGLI cloud products. *Progress in Earth and Planetary Science*, **6**.
25. Takashima H., K. Hara, C. Nishita-Hara, Y. Fujiyoshi, K. Shiraishi, M. Hayashi, A. Yoshino, A. Takami, and A. Yamazaki, 2019: Short-term variation in atmospheric constituents associated with local front passage observed by a 3-D coherent Doppler lidar and in-situ aerosol/gas measurements. *Atmospheric Environment*, **3**.
26. Wada, A., H. Tsuguti, K. Okamoto, and N. Seino, 2019: Air-Sea Coupled Data Assimilation Experiment for Typhoons Kilo, Etau and the September 2015 Kanto-Tohoku Heavy Rainfall with the Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 Sea Surface Temperature. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **97**, 553-575.
27. Nishita-Hara, C., M. Hirabayashi, K. Hara, A. Yamazaki, and M. Hayashi, 2019: Dithiothreitol-measured oxidative potential of size-segregated particulate matter in Fukuoka, Japan: effects of Asian dust events. *GeoHealth*, **3**, 160-173.
28. Hotta, D., and Y. Ota, 2019: Statistical generation of SST perturbations with spatio-temporally coherent growing patterns. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **145**, 1660-1673.
29. 酒井哲, 吉田智, 永井智広, 小司禎教, 2020: 豪雨予測に向けた水蒸気ライダーの開発と観測データを用いた研究. *レーザー研究*, **48**, 595-598.
30. Goto, D., Y. Sato, H. Yashiro, K. Suzuki, E. Oikawa, R. Kudo, T.N. Nagao, and T. Nakajima, 2020: Global aerosol simulations using NICAM.16 on a 14 km grid spacing for a climate study: improved and remaining issues relative to a lower-resolution model. *Geoscientific Model Development*, **13**, 3731-3768.
31. Sawada, Y., K. Okamoto, M. Kunii, and T. Miyoshi, 2020: Assimilating every-10-minute Himawari-8 infrared radiances to improve convective predictability. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, **124**, 2546-2561.
32. 泉敏治, 内野修, 酒井哲, 永井智広, 森野勇, 2019: つくばと佐賀に設置したミーライダーデータから算出した混合層高度の日変動・季節変動およびラジオゾンデ・客観解析データとの比較. *天気 (論文・短報)*, **66**, 345-357.
33. Otsuka, M., H. Seko, M. Hayashi, and K. Koizumi, 2021: Data Validation and Mesoscale Assimilation of Himawari-8 Optimal Cloud Analysis Products. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **38**, 223-242.
34. 青木輝夫, 的場澄人, 庭野匡思, 朽木勝幸, 谷川朋範, 竹内望, 山口悟, 本山秀明, 藤田耕史, 山崎哲秀, 飯塚芳徳, 堀雅裕, 島田利元, 植竹淳, 永塚尚子, 大沼友貴彦, 橋本明弘, 石元裕史, 田中泰宙, 大島長, 梶野瑞王, 足立光司, 黒崎豊, 杉山慎, 津滝俊, 東久美子, 八久保晶弘, 川上薫, 木名瀬健, 2021: SIGMA 及び関連プロジェクトによるグリーンランド氷床の上の大気・雪氷・雪氷微生物研究- ArCS II プロジェクトへのつながり -. *雪氷*, **83(2)**.
35. Ikuta, Y., Okamoto, K. and T. Kubota, 2021: One - dimensional maximum - likelihood estimation for spaceborne precipitation radar data assimilation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **147**, 858-875.

36. Fujii, Y., T. Ishibashi, T. Yasuda, Y. Takaya, C. Kobayashi, and I. Ishikawa, 2021: Improvements in tropical precipitation and sea surface air temperature fields in a coupled atmosphere-ocean data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **147**, 1317–1343.
37. Fujiwara, M., T. Sakai, T. Nagai, K. Shiraishi, Y. Inai, S. Khaykin, H. Xi, T. Shibata, M. Shiotani, and L. L. Pan, 2021: Lower-stratospheric aerosol measurements in eastward shedding vortices over Japan from the Asian summer monsoon anticyclone during the summer of 2018. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **21**, 3073–3090.

(2) 査読論文以外の著作物（翻訳、著書、解説）：16件

1. Chaikovsky, A., Bril, A., Dubovik, O., Fedarenka, A., Goloub, P., Hu, Q., Lopatin, A., Lapyonok, T., Miatselskaya, N., Torres, B., Fuertes, D., Peshcharankou, V., Podvin, T., Popovici, I., Liu, D., Li, Z., Soupiona, O., Mylonaki, M., Mona, L., Giunta, A.,, 2020: Synergetic Observations by Ground-Based and Space Lidar Systems and Aeronet Sun-Radiometers: A Step to Advanced Regional Monitoring of Large Scale Aerosol Changes. *EPJ Web of Conferences*, **237**.
2. Ikuta, Y., H. Kusabiraki, K. Kawano, T. Anzai, M. Ujiie, S. Nishimoto, Y. Ota and M. Narita, 2020: A New Data Assimilation System and Upgrading of Physical Processes in JMA's Meso-scale NWP System. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Earth System Modelling*, **50**. (submitted)
3. Seko, H., and Y., Shoji, 2020: Impact of Data Assimilation of Shipborne GNSS Data on Rainfall Forecast (Part 2). *CAS/JSC WGNE Research Activities in Earth System Modelling*, **50**, 1–19–20.
4. T. Fujita, H. Seko, T. Kawabata, D. Hotta, K. Sawada, Y. Ikuta, M. Kunii, T. Tsukamoto, and G. Akimoto, 2019: Time and Space Observation Error Correlation of Doppler Radar Radial Winds. *extended abstract in the 39th International Conference on Radar Meteorology, American Meteorological Society, 16–20 Sep. 2019, Nara, Japan*.
5. 佐藤正樹, 川畑拓矢, 宮川知己, 八代尚, 三好建正, 2021: 「富岳」による新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測. *繊維学会誌*, **77**, 54.
6. 岡本幸三、大和田浩美、藤田匡、別所康太郎、高橋昌也、太田芳文、計盛正博、大塚道子、瀬古弘、石田春磨、上清直隆、石元裕史、林昌宏、安藤昭芳、横田寛伸, 2021: ひまわり 8・9 号後継衛星検討のためのハイパースペクトル赤外サウンドの数値予報インパクト調査. *測候時報*, **87**, 99–150.
7. 筆保弘徳、山崎哲、中村哲、安成哲平、吉田龍二、釜江陽一、下瀬健一、大橋唯太、堀田大介, 2020: 気象術語事典：全方位解析天気予報等最尖端的気象学知識. *気象術語事典：全方位解析天気予報等最尖端的気象学知識*.
8. 岡本幸三, 2020: 2018年度秋季大会シンポジウム「未来を拓く気象観測のあり方」の報告 3. 衛星データ同化・再解析. *天気*, **67**, 645–648.
9. 岡本創, 木村俊義, 境澤大亮, 石井昌憲, 西澤智明, 石元裕史, 佐藤可織, 及川栄治, 2020: イメージング FTS とドップラーライダーによる 全球風観測. *レーザーセンシング学会誌*, **1-2**, 67–71.
10. 川畑拓矢, 上野玄太, 中野慎也, 藤井陽介, 三好建正, 小守信正, 増田周平, 眞木貴史, 土居知将, 野村俊一, 雨宮新, 山崎哲, 露木義, 2020: 第10回データ同化ワークショップの報告. *天気*, **67**, 455.
11. 瀬古弘、小泉耕、瀬之口敦, 2020: SSR モード S データの同化実験. *数値予報課報告・別冊第66号*, 142–144.
12. 藤田匡, 2020: 観測誤差相関を考慮した変分法によるドップラー速度データ同化. *数値予報課報告・別冊*, **66**, 145–155.

13. 小司禎教, 2020: 精密衛星測位 (GNSS) を用いた水蒸気観測と気象への利用. 第18回英弘シンポジウム”異常気象と局地現象”, 18, 53-60.
14. 筆保弘徳、山崎哲、中村哲、安成哲平、吉田龍二、釜江陽一、下瀬健一、大橋唯太、堀田大介, 2019: ニュース・天気予報がよくわかる気象キーワード事典. ニュース・天気予報がよくわかる気象キーワード事典.
15. 瀬古弘, 和田章義, 村田昭彦, 宮川知己, 竹見哲也, 福井真, 川畑拓矢, 北村祐二, 清木達也, 堀田大介, 2019: 第5回非静力学モデルに関する国際ワークショップの報告. 天気, 66, 501-506.
16. 瀬古弘, 津田敏隆, 2019: メソスケール LETKF システムを用いた GNSS 掩蔽観測の屈折率データの同化実験. 月刊海洋号外「新野宏教授退職記念号」, 62, 111-114.

(3) 学会等発表 : 119 件

1. 吉田智、酒井哲、永井智広、小司禎教、瀬古弘, Impact of low-level moisture and convergence on initiation and development of cumulonimbus, AGU Fall Meeting 2020, 2020年12月, 米国, virtual
2. Okamoto, K., H. Owada, T. Fujita, M. Kazumori, M. Otsuka, Y. Ota, N. Uekiyo, H. Seko, A. Ando, H. Yokota, OSSE for hyperspectral IR sounder on the Himawari follow-on program, 7th workshop on the impact of various observing system on NWP, 2020年12月, online
3. Hotta, D., T. Kadowaki, H. Yonehara, and T. Ishibashi, “Twin-analysis” verification: a new verification approach that alleviates pitfalls of “own-analysis” verification when applied to short-range forecasts, International Verification Methods Workshop Online, 2020年11月, オンライン
4. Okamoto, K., and M. Hayashi, Examination of observation and model error for all-sky infrared radiance assimilation, ECMWF/EUMETSAT NWP SAF Workshop on the treatment of random and systematic errors in satellite data assimilation for NWP, 2020年11月, online
5. Kondo, K., S. Kotsuki, and T. Miyoshi, A local particle filter based on non-Gaussian statistics using an intermediate AGCM, Data Assimilation Seminar, 2020年9月, オンライン
6. Okamoto, K., Impacts of potential usage of hyperspectral IR sounder on Himawari-8/-9 follow-on program, the coordination group for meteorological satellites (CGMS) - 48 Plenary, 2020年8月, online, online
7. Ishibashi, T., Observation impact study in global numerical weather prediction, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
8. Ishibashi, T., Data assimilation of lightning observation data for global numerical weather prediction, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
9. Shoji, Y., Relationship between errors in ship-borne GNSS derived PWVs and that in vertical coordinates, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
10. 瀬古弘、小司禎教、堀田大介、小泉耕、幾田泰醇, Impacts of vessel GNSS data on the heavy rainfall forecasts obtained by JMA’s mesoscale data assimilation system (NAPEX), JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
11. Aonashi, K., K. Okamoto, M. Yamaguchi, and T. Tashima, Introduction of the mixed-lognormal PDF and a new displacement correction method for precipitation to EnVar for all-sky MWI TB assimilation, The 4th Joint JCSDA-ECMWF Workshop on Assimilating Satellite Observations of Clouds and Precipitation into NWP Models, 2020年2月, イギリス, レディング

12. Okamoto, K., All-sky infrared assimilation overview, 4th workshop on assimilating satellite cloud and precipitation observations for NWP, 2020年2月, イギリス, レディング
13. Sakai, T., T. Nagai, S. Yoshida, T. Kawabata, Y. Shoji, and K. Shiraishi, Sea breeze front observation with water vapor lidar and Doppler lidar at Tokyo Bay -Case of localized heavy rainfall on 19 August 2017-, AMS 100th Annual Meeting, 2020年1月, アメリカ, ボストン
14. Miyoshi, T., S. Kotsuki, K. Kondo, and R. Potthast, Local Particle Filter Implemented with Minor Modifications to the LETKF Code, AMS 100th Annual Meeting, 2020年1月, アメリカ, ボストン
15. Kondo, K., and T. Miyoshi, Non-Gaussian statistics in global atmospheric dynamics with a 10240-member ensemble Kalman filter experiment using an intermediate AGCM, American Geophysical Union 2019 Fall meeting, 2019年12月, アメリカ, サンフランシスコ
16. Kotsuki, S., T. Miyoshi, K. Kondo, and R. Potthast, Local Particle Filter Implemented with Minor Modifications to the LETKF Code, American Geophysical Union 2019 Fall meeting, 2019年12月, アメリカ, サンフランシスコ
17. Kudo, R., H. Iwabuchi, T. Takano, H. Irie, A. Damiani, and P. Khatri, Ground-based remote sensing of heterogeneous clouds using sky-view camera and three-dimensional radiative transfer, 8th International EarthCARE Science Workshop, 2019年11月, 福岡
18. Okamoto, K., K. Bessho and M. Kachi, JMA and JAXA, The 22nd International TOVS Study Conference, 2019年11月, カナダ, Saint-Sauveur,
19. Okamoto, K., Y. Sawada, M. Kunii, T. Hashino, M. Nakagawa, M. Hayashi, Evaluation and assimilation of all-sky infrared radiances of Himawari-8 in the regional and global data assimilation system., The 22nd International TOVS Study Conference, 2019年11月, カナダ, Saint-Sauveur,
20. Sakai, T., T. Nagai, S. Yoshida, Y. Shoji, and O. Uchino, Lidar Research at MRI, Steering committee meeting of the Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC), 2019年10月, 茨城県つくば市
21. Seko, H., E. Sato, H. Yamauchi, Y. Shoji, and S. Satoh, Refractivity distributions over the Kanto and Osaka plains and their impacts on the rainfall forecasts, 39th International Conference on Radar Meteorology, 2019年10月, 奈良市
22. Hayashi, M., and H. Ishimoto, Volcanic Ash Retrieval by Himawari-8 using Refractive Index Model Estimated from Hyper Spectral Infrared Sounder Data, Joint Satellite Conference, 2019年10月, アメリカ, Boston
23. Ishimoto, H., M. Hayashi, and Y. Mano, Development of fast radiative transfer model MBCRM for analysis of volcanic ash clouds measured by hyperspectral infrared sounder, 2019年合同衛星会議, 2019年10月, アメリカ, ボストン
24. Okamoto, K., Y. Sawada, M. Kunii, T. Hashino, M. Nakagawa, and M. Hayashi, Experimental assimilation of all-sky infrared radiances of Himawari-8, Joint Satellite Conference, 2019年10月, アメリカ, Boston
25. Kawabata, T., and G. Ueno, What is the source of chaos in MCS?, The EMS Annual Meeting: European Conference for Applied Meteorology and Climatology 2019, 2019年9月, デンマーク, コペンハーゲン
26. Khatri, P., H. Iwabuchi, T. Hayasaka, H. Irie, T. Takamura, A. Yamazaki, and A. Damiani, Cloud Retrieval from Surface Using Zenith Radiances, AOGS 16th Annual Meeting, 2019年8月, Singapore, Suntec City

27. Okamoto, K, Assimilation of Passive and Active Sensors on Satellite to Improve Tropical Cyclone Forecasts, Asia Oceania Geosciences Society 16th Annual Meeting (AOGS2019), 2019年7月, シンガポール, シンガポール
28. Oyama, R., K. Okamoto, T. Iriguchi, H. Murata, H. Fudeyasu, K. Cheung, and K. Tsuboki, Analysis of atmospheric profiles within tropical cyclones using the new-generation satellite observations, Asia Oceania Geosciences Society 16th Annual Meeting (AOGS2019), 2019年7月, シンガポール, シンガポール
29. Yoshida, S., T. Sakai, T. Nagai, S. Yokota, H. Seko, Y. Shoji, and K. Shiraishi, Development of a mobile water vapor Raman lidar and its application for data assimilation, Asia Oceania Geosciences Society 16th Annual Meeting (AOGS2019), 2019年7月, シンガポール, シンガポール
30. Seko, H., M. Kunii, Y. Sawada, K. Okamoto, K. Ito, K. Shimoji, Improvements of Heavy Rainfall and Typhoon Forecasts Reproduced by Super-computer 'K', Asia Oceania Geosciences Society 16th Annual Meeting (AOGS2019), 2019年7月, シンガポール, シンガポール
31. Seko, H., W. Mashiko, T. Tamura, H. Niino, and S. Yokota, Tsukuba Tornado with Fujita Scale 3 Reproduced by Super-computer 'K', Asia Oceania Geosciences Society 16th Annual Meeting (AOGS2019), 2019年7月, シンガポール, シンガポール
32. Ishimoto, H., S. Adachi, and K. Masuda, X-ray micro-CT imagery of deposited snow in optical modeling of atmospheric ice particles, 第18回電磁気と光散乱会議 (ELS-XVIII), 2019年6月, 中国, 杭州
33. Seko, H., M. Kunii, S. Yokota, K. Shimoji, Y. Sawada, K. Okamoto, and K. Ito, Data Assimilation Studies using Big Observation Data in the Projects of Post K and BDA, JpGU meeting 2019, 2019年5月, 千葉県千葉市
34. Ishibasi, T., T. Iriguchi, Y. Fujii, T. Yasuda, Y. Takaya, N. Saito, T. Onogi, Numerical Weather Prediction Experiments using a Coupled Atmosphere-Ocean Data Assimilation System in JMA/MRI (3), JpGU meeting 2019, 2019年5月, 千葉県千葉市
35. Ishibasi, T., Superposition of atmospheric states using information redundancy for Numerical Weather Prediction, JpGU meeting 2019, 2019年5月, 千葉県千葉市
36. Seko, H., E. Sato, and H. Yamauchi, Refractivity Distributions over the Kanto Plain Obtained by Dual-polarization Radar, JpGU meeting 2019, 2019年5月, 千葉県千葉市
37. Nagai, T., T. Sakai, S. Yoshida, T. Izumi, S. Yokota, H. Seko, Y. Shoji, and K. Shiraishi, Development and Observation of Water Vapor Raman Lidars for Localized Torrential Rainfall Prediction, 日本地球惑星科学連合2019年大会, 2019年5月, 千葉県千葉市
38. Shoji, Y., T. Sakai, A. Adachi, S. Yoshida, and T. Nagai, Study of the Mechanisms of Severe Thunderstorm in Tokyo Metropolitan Area using High Frequent Assimilation of GNSS and Other Ground-based Observations, JpGU meeting 2019, 2019年5月, 千葉県千葉市
39. Shoji, Y., T. Kato, Y. Terada, T. Tsuda, and M. Yabuki, Study of Water Vapor Monitoring in the Open Ocean using Kinematic Precise Point Positioning, 日本地球惑星科学連合2019年大会, 2019年5月, 千葉県千葉市
40. Shoji, Y., T. Tsuda, T. Kato, T. Terada, and M. Yabuki, Ocean Platform GNSS Meteorology for Heavy Rainfall Prediction, Living Planet Symposium 2019, 2019年5月, イタリア, ミラノ
41. Shoji, Y., T. Sakai, A. Adachi, S. Yoshida, and T. Nagai, High Space-time Resolution Analysis of Atmospheric Fields using GNSS and Other Observations to Study the

- Mechanisms of Local Heavy Rainfall in Tokyo Metropolitan Area, Living Planet Symposium 2019, 2019年5月, イタリア, ミラノ
42. Fujii, Y., C. Kobayashi, I. Ishikawa, Y. Takaya, and T. Ishibashi, Evaluation of the lead-lag relationship between SST and precipitation in a coupled reanalysis using TAO-TRITON data, 2020 AGU Fall Meeting, 2020年12月, アメリカ, サンフランシスコ
 43. 吉田智、白石浩一、酒井哲、永井智広、幾田泰醇、小司禎教、瀬古弘、清水慎吾, 九州での水蒸気ライダー観測の初期結果, 第24回大気ライダー研究会, 2021年3月, オンライン
 44. 酒井哲, 吉田智, 永井智広, 小司禎教, 気象研ラマンライダーと Vaisala 差分吸収式ライダーによる大気下層の水蒸気分布比較観測, 第24回大気ライダー研究会, 2021年3月, オンライン
 45. 岡本幸三, 林昌宏, 端野典平, 中川雅之, 奥山新, ひまわり全天候赤外輝度温度データ同化に向けた、シミュレーションの検証, GPM および衛星シミュレータ合同研究集会, 2021年3月, オンライン
 46. 谷川朋範, 青木輝夫, 石元裕史, 増田一彦, 庭野匡思, 堀雅裕, 八久保晶弘, 的場澄人, 杉浦幸之助, 島田利元, 大河原望, 積雪と海水の波長別偏光特性, 雪氷研究大会 (2020・オンライン), 2020年11月, オンライン
 47. 近藤圭一, 三好建正, 非ガウス分布の定量的評価による非ガウスデータ同化, 第22回非静力学モデルに関するワークショップ, 2020年11月, オンライン
 48. 澤田謙, 変分法同化システムへの過飽和制約の導入, 第22回非静力学モデルに関するワークショップ, 2020年11月, オンライン, オンライン
 49. 瀬古弘, メソアンサンプル予報を用いた豪雨の相関解析, 第22回非静力学モデルに関するワークショップ, 2020年11月, オンライン, オンライン
 50. 藤田匡, 岡本幸三, 瀬古弘, 大塚道子, 大和田浩美, ひまわり後継衛星の GeoHSS によるメソ数値予報へのインパクト調査, 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 51. 小司禎教, 清野直子, 凌風丸による 2020年梅雨期東シナ海ゾンデ観測, 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 52. 瀬古弘, 幾田泰醇, 小司禎教, 堀田大介, 現業同化システムに準拠したメソ数値予報実験システムを用いた船舶 GNSS の同化実験 (その2), 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 53. 吉田智、酒井哲、永井智広、小司禎教、瀬古弘、白石浩一、清水慎吾, 長崎におけるライダーによる水蒸気鉛直分布の初期観測, 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 54. 石橋俊之, 雷光観測の全球同化 (序), 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 55. 岡本幸三, 大和田浩美, 藤田匡, 岡部いづみ, 数値予報データ同化における静止衛星観測の利用, 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 56. 近藤圭一, 岡本幸三, 入口武史, 藤井秀幸, 青梨和正, Dynamic Emissivity を用いた陸域衛星輝度温度同化の高度化, 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 57. 林昌宏, 岡本幸三, DARDAR プロダクトとひまわり 8号観測を用いた RTTOV 氷雲放射スキームの評価, 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 58. 川畑拓矢、上里達実、横矢直人、酒井哲、吉田智、高橋温志、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, 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 59. 川畑 拓矢, Le Duc, 令和2年7月豪雨における線状降水帯の確率予測, 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 60. 幾田泰醇, 瀬古弘, 小司禎教, 令和2年7月豪雨に対する船舶 GNSS の同化インパクトと発生要因, 日本気象学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン

61. 小司禎教, 移動体 GNSS 解析による可降水量誤差要因の考察, 日本気象学会 2020 年度秋季大会, 2020 年 10 月, オンライン
62. 吉田智、酒井哲、永井智広、小司禎教、瀬古弘, 下層水蒸気量と海風前線の対流発生への寄与 -羽田空港周辺 2018 年 9 月 2 日の事例-, 日本気象学会 2020 年度秋季大会, 2020 年 10 月, オンライン
63. 川畑拓矢, 大アンサンブルが予測する豪雨・洪水, 「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」第 1 回シンポジウム ~豪雨・台風の高精度な予測をめざして~, 2020 年 9 月, オンライン
64. 川畑拓矢、Le Duc、斉藤和雄、大泉伝, 令和 2 年 7 月豪雨における線状降水帯の確率予測, 第一回大アンサンブルとアプリケーションに関する研究会, 2020 年 9 月, オンライン, オンライン
65. 阿保真, 長澤親生, 柴田泰邦, 内野修, 酒井哲, 柴田隆, 勝俣昌己, 衛星搭載 DIAL によるグローバルな水蒸気分布観測の提案, 第 38 回レーザーセンシングシンポジウム, 2020 年 9 月, 日本
66. 吉田智, 酒井哲, 永井智広, 小司禎教, 瀬古弘, 下層水蒸気の積乱雲の発生発達への寄与, 第 38 回レーザーセンシングシンポジウム, 2020 年 9 月, 日本
67. 石橋俊之, 数値天気予報のための全球大気解析の高精度化に関する研究, 神戸大学惑星科学研究センターセミナー, 2020 年 8 月, リモート
68. 吉田智、瀬古弘、酒井哲、永井智広、小司禎教、国井勝, 観測システムシミュレーション実験を用いた水蒸気観測の影響評価, 日本気象学会 2020 年度春季大会, 2020 年 6 月, オンライン
69. 小司禎教, 潮汐モデルを用いた船舶 GNSS 可降水量誤差補正の試み, 日本気象学会 2020 年度春季大会, 2020 年 5 月, 川崎市
70. 谷川朋範, 庭野匡思, 大河原望, 石元裕史, 青木輝夫, ニーオルスンにおける全天分光日射計を用いた積雪粒径・積雪不純物濃度の推定, 日本気象学会 2020 年度春季大会, 2020 年 5 月, オンライン
71. 藤田匡, 瀬古弘, 川畑拓矢, 澤田謙, 堀田大介, 幾田泰醇, 國井勝, 塚本暢, 秋元銀河, ドップラー速度の観測誤差相関を考慮した変分法データ同化の検討, 日本気象学会 2020 年度春季大会, 2020 年 5 月, オンライン
72. 瀬古弘, 小司禎教, 堀田大介, 小泉耕, 幾田泰醇, 現業同化システムに準拠したメソ数値予報実験システムを用いた船舶 GNSS の同化実験, 日本気象学会 2020 年度春季大会, 2020 年 5 月, オンライン
73. 瀬古弘, 横田祥, 吉田智, 特異値分解解析による「全外し」を軽減するアンサンブル 初期摂動作成法と最適な観測網システムの開発 (その 2), 日本気象学会 2020 年度春季大会, 2020 年 5 月, オンライン
74. 小司禎教, 酒井哲, 永井智広, 吉田智, 首都圏短時間強雨の環境場 -東風の特徴-, 日本気象学会 2020 年度春季大会, 2020 年 5 月, 川崎市
75. 澤田謙, 変分法同化システムにおける過飽和制約の導入, 日本気象学会 2020 年度春季大会, 2020 年 5 月, オンライン
76. 近藤圭一, 岡本幸三, 入口武史, 藤井秀幸, 青梨和正, Dynamic Emissivity を用いた陸域衛星輝度温度同化の高度化, 日本気象学会 2020 年度春季大会, 2020 年 5 月, オンライン
77. 石橋俊之, 雷光観測の全球同化 (序), 日本気象学会 2020 年度春季大会, 2020 年 5 月, オンライン
78. 林昌宏, 石元裕史, GCOM-C/SGLI の熱赤外観測データを用いた火山灰解析, 日本気象学会 2020 年度春季大会, 2020 年 5 月, オンライン
79. 山崎明宏, 工藤玲, 内山明博, 居島修, 分光型日射計による精密放射観測装置の開発 (2), 日本気象学会 2020 年度春季大会, 2020 年 5 月, オンライン

80. 瀬古弘, 革新的な数値天気予報と被害レベル推定に基づく高度な気象防災のサブ課題紹介, ポスト「京」(スーパーコンピュータ「富岳」)重点課題4「観測ビッグデータを活用した気象と地球環境の予測の高度化」最終成果報告会, 2020年1月, 東京
81. 藤田匡, 瀬古弘, 川畑拓矢, 澤田謙, 堀田大介, 幾田泰醇, 國井勝, 塚本暢, 秋元銀河, 観測誤差時空間相関を考慮した変分法によるドップラー速度データ同化の検討, ポスト「京」(スーパーコンピュータ「富岳」)重点課題4「観測ビッグデータを活用した気象と地球環境の予測の高度化」最終成果報告会, 2020年1月, 東京
82. 小司禎教, 精密衛星測位(GNSS)を用いた水蒸気観測と気象への利用, 第18回英弘シンポジウム”異常気象と局地気象”, 2020年1月, 東京都
83. 川畑拓矢 上野玄太, NHM-RPFを用いた観測誤差の動的推定, 第21回非静力学モデルに関するワークショップ, 2019年11月, 三重県津市
84. 藤田匡, 瀬古弘, 川畑拓矢, 澤田謙, 堀田大介, 幾田泰醇, 國井勝, 塚本暢, 秋元銀河, 観測誤差相関を考慮した変分法によるドップラー速度データ同化の検討, 非静力学モデルに関するワークショップ, 2019年11月, 三重県津市
85. 瀬古弘, 小泉耕, 小司禎教, 瀬之口敦, メソNAPEXを用いたSSRモードS航空機データと船舶GNSS可降水量の同化実験, 第21回非静力学モデルに関するワークショップ, 2019年11月, 三重県津市
86. 澤田謙, スピンドアウン問題と過飽和抑制, 非静力学モデルに関するワークショップ, 2019年11月, 三重市
87. 津口裕茂, 線状降水帯がもたらす集中豪雨のしくみ-近年の顕著事例を例として-, 気象大学校紫雲祭, 2019年11月, 柏
88. 澤田謙, スピンドアウン問題と過飽和抑制, 日本気象学会2019年度秋季大会, 2019年10月, 福岡市
89. 青梨和正, 次世代のマイクロ波イメージャ降水リトリーバルアルゴリズム開発: 固体降水の厚みに依る散乱特性の変動の導入, 日本気象学会2019年度秋季大会, 2019年10月, 福岡県福岡市
90. 石元裕史, 足立アホロ, 安達聖, 積雪マイクロCTデータを用いた降雪粒子のモデル化とレーダー反射特性の計算, 日本気象学会秋季大会, 2019年10月, 福岡県福岡市
91. 吉田智, 酒井哲, 瀬古弘, 永井智広, 小司禎教, 横田祥, 水蒸気ライダーによる水蒸気鉛直分布の観測とデータ同化, 日本気象学会2019年度秋季大会, 2019年10月, 福岡県福岡市
92. 瀬古弘, 横田祥, 福井真, 吉田智, 特異値分解解析を利用した「全外し」を軽減するためのアンサンブル初期摂動作成法の開発(その1), 日本気象学会秋季大会, 2019年10月, 福岡県福岡市
93. 酒井哲, 吉田智, 永井智広, 川畑拓矢, 小司禎教, 水蒸気ライダーとドップラーライダーによる海風の観測 -2017年8月19日の局地的大雨事例-, 日本気象学会2019年度秋季大会, 2019年10月, 福岡県福岡市
94. 星野俊介, 小司禎教, 2018年9月18日に東京都で観測された大雨の事例解析, 日本気象学会2019年度秋季大会, 2019年10月, 福岡県福岡市
95. 小司禎教, 船舶搭載GNSSによる東シナ海水蒸気観測実験, 日本気象学会2019年度秋季大会, 2019年10月, 福岡県福岡市
96. 小司禎教, 酒井哲, 足立アホロ, E-S風系型首都圏短時間強雨への下層水蒸気の寄与 -2017年8月19日の事例-, 日本気象学会2019年度秋季大会, 2019年10月, 福岡県福岡市
97. 堀田大介, 変分自己符号化器による前処理を通じた非ガウス観測のデータ同化, 日本気象学会2019年度秋季大会, 2019年10月, 福岡県福岡市
98. 工藤玲, 岩渕弘信, 鷹野敏明, 入江仁士, Alessandro Damiani, Pradeep Khatri, 不均質に分布した雲の地上リモートセンシング手法の開発, 日本気象学会2019年度秋季大会, 2019年10月, 福岡

99. 藤田匡, 瀬古弘, 川畑拓矢, 澤田謙, 堀田大介, 幾田泰醇, 國井勝, 塚本暢, 秋元銀河, 変分法によるレーダーデータ同化高度化の検討, 日本気象学会 2019 年度秋季大会, 2019 年 10 月, 福岡
100. 藤田匡, 大塚道子, 岡本幸三, 瀬古弘, 大和田浩美, ひまわり後継衛星ハイパースペクトル赤外サウンダのメソ数値予報 OSSE, 日本気象学会 2019 年度秋季大会, 2019 年 10 月, 福岡
101. 石橋俊之, 4 次元の背景誤差共分散行列を使った 4D-Var によるアンサンブル生成と決定論的解析 (4), 日本気象学会 2019 年度秋季大会, 2019 年 10 月, 福岡県福岡市
102. 近藤圭一, 三好建正, 背景誤差の非ガウス分布を考慮したアンサンブル同化手法, 日本気象学会 2019 年度秋季大会, 2019 年 10 月, 福岡県福岡市
103. 岡本幸三, 石井昌憲, 久保田拓志, 佐藤篤, 境澤大亮, 西澤智明, 松本紋子, 津上哲也, 石橋俊之, 田中宙中, Philippe Baron, 青木誠, 沖理子, 佐藤正樹, 岩崎 俊樹, 数値予報精度向上のための衛星搭載ドップラー風ライダーによる全球風観測, 第 37 回レーザセンシングシンポジウム, 2019 年 9 月, 千葉県千葉市
104. 吉田智, 酒井哲, 瀬古弘, 永井智広, 小司禎教, 横田祥, 白石浩一, ラマンライダーによる水蒸気鉛直分布観測と大雨予測, 第 37 回レーザセンシングシンポジウム, 2019 年 9 月, 千葉県千葉市
105. 酒井哲, 吉田智, 永井智広, 川畑拓矢, 小司禎教, 水蒸気ライダーとドップラーライダーによる東京湾岸における海風の観測 -2017 年 8 月 19 日の局地的大雨事例-, 第 37 回レーザセンシングシンポジウム, 2019 年 9 月, 千葉県千葉市
106. 石橋俊之, 全球解析に関する最近の研究から, 第 3 回 理研・気象庁 データ同化に関する情報交換会, 2019 年 8 月, 東京都
107. 川畑拓矢 上野玄太, MCS におけるカオスの起源を探る, 第 6 回メソ気象セミナー, 2019 年 7 月, 三重県伊勢市
108. 近藤圭一, 不完全な背景誤差共分散がアンサンブルデータ同化に与える影響, 統数研・気象研勉強会, 2019 年 6 月, 港区
109. 岡本幸三, 大和田浩美, 計盛正博, 大塚道子, 太田芳文, 上清直隆, 瀬古弘, 安藤昭芳, 吉田良, 石元裕史, 林昌宏, 石田春磨, 佐藤芳昭, 国松洋, 別所康太郎, 横田寛伸, ひまわり後継衛星に向けたハイパースペクトル赤外サウンダのインパクト調査, 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, 2019 年 5 月, 千葉市
110. 青梨和正, 次世代のマイクロ波イメージャ降水リトリバルアルゴリズム開発: 固体降水の厚みの変動を考慮した散乱アルゴリズム, 日本気象学会 2019 年度春季大会, 2019 年 5 月, 東京都
111. 小田真祐子, 変分法同化法のための 2 スケール局所化手法, 日本気象学会 2019 年度春季大会, 2019 年 5 月, 東京都
112. 石橋俊之, 4 次元の背景誤差共分散行列を使った 4D-Var によるアンサンブル生成と決定論的解析 (3), 日本気象学会 2019 年度春季大会, 2019 年 5 月, 東京都渋谷区
113. 瀬古弘, 小泉耕, 小司禎教, 加藤照之, 船舶やブイで観測した GNSS データを用いた同化実験 (その 1), 日本気象学会 2019 年度春季大会, 2019 年 5 月, 東京都渋谷区
114. 工藤玲, 岩淵弘信, 鷹野敏明, 入江仁士, Alessandro Damiani, Pradeep Khatri, スカイラジオメータによる雲の微物理・光学特性のリモートセンシング, 日本気象学会 2019 年度春季大会, 2019 年 5 月, 東京
115. 藤田匡, 成田正巳, 氏家将志, 河野耕平, 幾田泰醇, 沢田雅洋, 國井勝, 塚本暢, 草開浩, 秋元銀河, 安齋太朗, 欠畑賢之, 西本秀祐, 小野耕介, 倉橋永, 計盛正博, 本田有機, メソアンサンブル予報システム (MEPS) の運用開始に向けて, 日本気象学会 2019 年度春季大会, 2019 年 5 月, 東京
116. 林昌宏, 石元裕史, ひまわり 8 号と赤外サウンダによる火山灰解析アルゴリズムの開, 日本気象学会 2019 年度春季大会, 2019 年 5 月, 東京

117. 近藤圭一, モデルが不完全な場合における背景誤差相関について, 日本気象学会 2019 年度春季大会, 2019 年 5 月, 東京都渋谷区
118. 岡本幸三, 大和田浩美, 計盛正博, 大塚道子, 太田芳文, 上清直隆, 瀬古弘, 安藤昭芳, 吉田良, 石元裕史, 林昌宏, 石田春磨, 佐藤芳昭, 国松洋, 別所康太郎, 横田寛伸, ひまわり後継衛星に向けたハイパースペクトル赤外サウンダのインパクト調査, 日本気象学会 2019 年度春季大会, 2019 年 5 月, 東京都
119. 瀬古弘, 横田祥, 佐藤英一, 小司禎教, 山内洋, 佐藤晋介, 川村誠治, 多種の高頻度高密度観測データを用いた局地的大雨の同化実験(その1), 日本気象学会 2019 年度春季大会, 2019 年 5 月, 東京都渋谷区

報道・記事

- ・時事通信(2019年10月26日)「海上からの水蒸気流入観測=九州大雨時、船上で-予測精度向上に期待・気象研」
- ・読売新聞(2020年1月30日夕刊)「海上の水蒸気で豪雨予測」
- ・朝日新聞(2020年7月3日朝刊)「線状降水帯」予測し被害防げ」
- ・時事通信(2020年11月2日)「水蒸気観測やスパコンで向上 豪雨予測精度-気象研」
- ・毎日新聞(2020年11月6日朝刊)「線状降水帯 海から予測」
- ・長崎放送(2020年11月18日放送)番組名:PINT 特集「特集:線状降水帯を予測する水蒸気ライダー」
- ・JIJI.COM(2020年11月2日)「水蒸気観測やスパコンで向上 豪雨予測精度-気象研」
- ・NHK(2020年11月3日)「スパコン「富岳」高い確率で「線状降水帯」予測 気象庁が解析」
- ・読売新聞電子版(会員限定)(2020年11月3日)「線状降水帯 半日前に予測…気象研 10年後メドに実用化」

その他

(講演、アウトリーチ等)

酒井 哲 集中豪雨予測のための水蒸気ライダーの開発 令和2年度気象研究所研究成果発表会(2020年12月16日-2021年1月27日)

川畑 拓矢 スーパーコンピュータ「富岳」を用いた豪雨や洪水の予測に向けて、令和2年度気象研究所研究成果発表会(2020年12月16日-2021年1月27日)

吉田 智 雷までの距離を測ろう クエスチョンハンティング -つくばこどもクエスチョンオンライン- 2020年8月1日~23日

(受賞等)

青梨 和正 衛星観測による全球降水マップの開発と社会での実利用推進に関わる功績 2019年日本気象学会 岸保・立平賞

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：2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）

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

〔応用気象研究部〕○村田昭彦、野坂真也、佐々木秀孝、仲江川敏之、村崎万代、川瀬宏明

〔気象予報研究部〕長澤亮二、北村祐二（令和元年度）、渡邊俊一（令和2年度）

〔気候・環境研究部〕高藪出（令和2年度）

〔併任：地球環境・海洋部〕ト部祐介、山田賢、加藤尚（令和元年度）、岡部裕己、後藤敦史（以上、令和2年度）

〔併任：気象大学校〕大泉三津夫

〔客員研究員〕藤部文昭

（副課題2）防災・交通分野への気象情報の活用

〔応用気象研究部〕○小畑淳、山口宗彦、川端康弘

（副課題3）産業活動に資する気候リスク管理

〔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

〔気候・環境研究部〕小林ちあき、高藪出（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〕萱場互起、宮脇祥一、後藤敦史（令和元年度）

〔客員研究員〕大竹秀明（令和2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ようについては、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のうちの一つとして、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、産業界で気候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势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管であるが、まだ調査・研究が未着手というのが現状である。これらの潜在的な分野で気候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、気候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・交通分野への気候情報の活用

大雨や台風など顕著な現象に対する防災気候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)

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)

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)

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

(全体)

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)

- 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)

- 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)

- 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

(中間評価時の到達目標)

(副課題1)

①気象庁の現業で使用されている数値モデル(asuca)を地域気候モデルとして使用するための問題点等を整理し、新モデル導入の指針を得る。高解像度SSTのモデル計算結果に対する効果を明らかにする。

②ディテクション&アトリビューション手法等を活用し、現在既に温暖化が顕在化しているかどうか検証する。降水現象の予測結果について、統計的手法によって信頼度を評価する。

③各現象(降水システム、局地風など)及び各要素(気温、雨、雪、風など)に応じて温暖化予測結果の分析を実施する。

(副課題2)

①予報の不確実性を定量化した新たなアンサンブル予報プロダクトを開発する。台風進路の診断的研究を行っている岐阜大学や予測可能性研究を行っている琉球大学と連携し、台風進路の気象学

的根拠の定量化とアンサンブル予報を用いた不確実性の定量化プロダクトを作成し、進路予報における予報根拠の拡充に貢献する。

②台風や大雨など顕著な現象に対する予報ガイダンスを開発する。本庁予報課や台風予測研究を行っている横浜国立大学、米国ハリケーンセンター等と連携して、台風予報ガイダンスの開発と改良を行う。

(副課題3)

①異業種・産学官交流に基づく各産業分野での潜在的な産業別の気候リスク管理需要の調査結果をまとめる。

②アンサンブル予報等を利用した先進的リスク管理手法の調査をまとめる。関係機関と協力してリスク管理手法の開発に着手する。また、リスク管理において利用される気象データ収集と予測精度、潜在的予測可能性の評価を行う。

③穀物生産高などの産業データを収集し、算定した既存の気候指標と産業データとの相関関係を見出し、その根拠を明らかにする。またより適切で簡便な気候指標を検討する。

研究の現状

(1) 進捗状況

(副課題1)

気象庁の現業で使用されている数値モデル(asuca)をベースとした地域気候モデルを導入するための調整、動作確認を実施すると共に、既存モデル(NHRCM)では海水の効果適切に取り入れるなどモデルの物理過程の改良にも取り組んだ。海面水温(SST)の時間分解能が降水に与える影響を調査し、日本海沿岸地域の冬季降水に対して大きな影響を与えていることが分かった。ディテクション&アトリビューション手法によって現在の温暖化顕在化の状況を検証し、温暖化により九州西部の大雨の頻度が増加していることが示された。また、統計的手法を活用することで降水量の再現・予測結果に対する信頼性を評価した。高密度な観測データを用いて高解像度モデルによる降水の再現性を検証すると同時に、高解像度予測結果から極端な降水の将来変化に関する解析を進めた。様々な現象(豪雨、台風など)、気象要素(降水、湿度など)に対して予測結果の分析を進めた。

(副課題2)

① 全球・メソアンサンブル予報の利活用

・マルチセンターアンサンブル手法(海外の気象局を含む全球アンサンブル予報のデータを利用)を開発し、令和元年6月に当手法による台風予報円を現業導入した。

・防災地域をよりの確に表現する予報の改善に向け、台風予報円を楕円にした効果を評価した査読論文を公表した。

・気象庁全球モデルを入力値とした渦位逆変換法による台風進路の診断手法(気象学的根拠の定量化)を開発中である。(今年度中達成見込み、②も兼)

② 防災業務に資する予報ガイダンスの開発

・台風発生環境場診断ツールを用いて環境場毎の台風発生予測可能性を調査した。今後、この手法をマルチセンターアンサンブル予報に応用する。

③ 予報大外し事例の抽出

・台風進路予報における大外し事例の原因調査を行い、北西太平洋域の代表的な指向流(高気圧縁辺流、偏西風、貿易風等)の他、モンスーントラフの表現の適切さも大きな要因となっていることを明らかにした。

その他、防災に資する研究及び広報として、観測とモデルを用いた台風の気候変化に関する論文の公表・報道発表、観測による大都市の視程の経年変化の論文、地球システムモデルによる火山噴火影響評価の論文の公表等を行った。

(副課題3)

①気象ビジネスコンソーシアムや研究会への出席、研究機関の個別訪問などを通して需要調査を行い、今後の連携について検討している。

②再生可能エネルギーと洪水予測について、メソアンサンブル予報データを用いた共同研究を始めた。発電ポテンシャル予測ではアンサンブル情報を利用することで予測精度が向上することが示され、氾濫ポテンシャル予測では良好な予測結果が得られた。

③簡便な気候指標として、WMO が提案する分野別気候指標について調査し、日本を対象として指標の算定を進めている。また、季節予報のアンサンブル平均を用いた大規模場気候指標を用いて穀物収量予測を進めている。

(2) これまで得られた成果の概要

(副課題 1)

①地域気候モデル及び数値実験設定の改良

・現業数値モデルの地域気候モデル化

気象庁の現業で使用されている数値モデル (asuca) をベースとした地域気候モデルを導入するための調整を行った。具体的には、全球再解析データ (JRA-55) や全球大気モデル (AGCM) での計算結果から asuca 用の境界値を作成するためのツールを整備した。その後、テストラン等の基本的な動作確認を行い、良好な結果を得た。さらに、地域気候モデルとして実行する際に必要なスキーム (スペクトルナッジング及び陸面過程) を導入した。

・陸面等の物理過程の改良

既存モデル (NHRCM) における陸面過程の改良の一環として、日本領域再解析データから陸面モデル (SiB) をオフラインで動かすことができるようにした。また、大気の物理過程の解明とモデル化に関する研究 (P 課題) と連携し、海氷の効果をモデルに適切に取り込む方法を導入した。海面水温 (SST) の時間分解能が降水に与える影響について調査した。その結果、日本海沿岸地域の冬季降水に対し SST の時間分解能が影響を与えており、特に冬季モンスーン発生時に影響が大きいことが分かった。

②モデルによる再現・予測結果に対する信頼度評価

・現在気候における温暖化影響の検出

地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース (d4PDF) を用いて過去の地球温暖化が日本の豪雨に及ぼす影響を調べたところ、九州西部での大雨が増加傾向にあることが示された。この要因について、温暖化に伴う可降水量の増加によって大雨の頻度が増加していたことが分かった。また、近年の気温上昇が平成 30 年 7 月豪雨に及ぼす影響について調べた。その結果、温暖化によって 6.7%程度の降水量の増加があったと見込まれ、Clausius-Clapeyron の関係に近いことが分かった。さらに、令和元年台風第 19 号に伴う関東甲信地方での大雨に対する影響についても調査し、1980 年以降及び工業化以降の気温及び海面水温の上昇はそれぞれ約 11%、約 14%の総降水量の増加に寄与したと見積もられた。この要因として気温上昇による水蒸気量の増加のほか、気温及び海面水温の上昇に伴って、台風自体がより発達したこと、中部山岳の風上で上昇気流がより強まったことが考えられる。

・統計的な手法を用いた地域気候シミュレーション結果の不確実性評価

気象学的現象として影響の大きい台風を取り上げ、再現・予測された降水量を台風及び非台風起源の降水量に層別化して解析を行った。他の現象と比べて低頻度な現象である台風に伴う降水データを全体の降水データから除外することで、理論的な降水頻度分布であるガンマ分布への適合度が高まり、再現・予測結果の信頼度が向上するという結果が得られた。これらの結果は、信頼度の高い予測データを社会へ提供する上での基礎資料となる。

・将来の気温上昇と降水量の変化の関係

d4PDF の全球平均気温 1.5°C 上昇、2°C 上昇、4°C 上昇の予測結果を用いて、日本域の降水量の変化を評価したところ、年降水量はほとんど変わらない一方、年最大 1 時間降水量は気温の上昇量にほぼ線形に比例して大きくなることが示された。この比例関係を踏まえると、あらゆる温度上昇に対する変化予測が推定可能となるので、予測データの適応策への活用促進が見込まれる。

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

・地形の詳細化が降水量再現性に与える影響

水平解像度の違いによる利根川流域における降水量の再現性の違いを高度毎に調べた。その結果、高地では 2km 格子モデルの降水量が 5km 格子モデルのそれよりも再現性が良かったが、低地では逆であった。高地では高解像度モデルによる地形の詳細化の効果が現れるものの、低地ではこの効果がなくなると共に対流の過度の集中が悪影響を及ぼしているためと考えられる。

・年最大時間降水量の将来変化に対する力学過程と熱力学過程の寄与

高解像度モデル (2km 格子) による予測結果を用いて、夏季の極端降水の将来変化に対する力学過程と熱力学過程の寄与を解析した。その結果、鉛直積算した水蒸気フラックス収束の変化はおおむね熱力学過程の寄与のほうが大きい、梅雨前線付近においては力学的過程が主体となっている

ことが分かった。そして、この違いは梅雨前線の位置が現在気候と将来気候で異なることで説明できることが分かった。

・台風に伴う降水の将来変化

地域気候モデル（5km 格子）による予測結果から、温暖化時は日本に接近する台風が減少するものの、台風に伴う降水（台風降水）の強度が強くなることが分かった。これらの効果が相殺することで、結果として台風降水の総量（総台風降水量）には有意な変化がなかった。また、現在でも起こり得る強度（極端ではない強度）の台風降水の頻度に有意な変化は見られなかった。

・相対湿度の無降水頻度の将来変化への影響

高解像度モデル（2km 格子）による予測結果を用いて、夏季の地上相対湿度が無降水頻度（時間）の将来変化に与える影響について調べた。その結果、相対湿度が高く且つ負の変化となる地域では無降水時間の割合が増加していた。また、相対湿度が高いほど僅かな変化が無降水時間に影響することが分かった。一方、相対湿度の比較的低い地域では無降水時間の目立った変化は見られなかった。

(副課題 2)

① 全球・メソアンサンブル予報の利活用

[台風進路予報]

本庁予報課と共同したプロジェクトチームのもと、令和元年6月にマルチセンターアンサンブル手法による台風予報円を現業導入した。これにより、アンサンブル予報による予報のばらつき（スプレッド）が小さい時は予報円の大きさを従来よりも小さく出来るなど、メリハリのある予報を提供出来るようになった。また、複数の現業予報センター（モデル）によるアンサンブル予報を用いることで、単独のアンサンブル予報を用いる場合よりも予報誤差とスプレッドの相関が高くなり、より適切に予報の不確実性を表現出来るようになった。（世界気象機関天気研究計画（WMO/WWRP）における「北西太平洋熱帯低気圧アンサンブル予測プロジェクト」（2009年から気象研で実施）の成果：「研究から現業へ」の成功例）現在の気象庁台風進路予報は、台風中心が70%の確率で入ると予測される範囲を予報「円」で示している。この予報円を「楕円」にした場合の効果を評価した。予報円を楕円にすることによって、台風の移動方向と移動速度のどちらに不確実性があるのか表現出来ること、また、楕円の面積は円の面積と比べて平均20%程度小さくなることを示した。（日本気象学会2020年気象集誌論文賞）台風進路の診断的研究に関して、岐阜大学で開発された渦位逆変換法による台風進路の診断手法を気象研スーパーコンピューターシステムに移植した（岐阜大学との共同研究「台風の移動の診断的評価」令和元年9月締結）。この手法を用いることにより、「台風は△時現在、太平洋高気圧にX%、上層のトラフにY%影響を受けて移動」という様に、台風の移動を気象学の解釈で定量的に理解することが出来る。今後、気象庁全球モデルを入力値とした当手法による台風進路の診断手法を開発する。

② 防災業務に資する予報ガイダンスの開発

[台風発生予報]

横浜国立大学との共同研究のもと、台風発生環境場毎の予測可能性を調査した。台風にまで発達する熱帯擾乱とそうでない熱帯擾乱の違いを大規模な流れパターンごと（シアライン（SL）、東西風合流域（CR）、モンスーンジャイア（GY）、偏東風波動（EW）、及び既存の台風（TC）からのロスビー波応答で発生したパターン（PTC））に調査した。その結果、SLとGYは海洋貯熱量が大きい時、CRは鉛直シアが弱い時、EWはより湿潤な時、そしてPTCは海面温度が高く先行のTCが強い時に台風まで発達し易いことが分かった。更に、横浜国立大学等で開発された台風発生環境場診断ツールを決定論的予測に適用して、環境場ごとの台風発生の予測可能性を調査した。SLによる予測可能性は高い一方、EWによる予測可能性は低いことが分かった。今後、この手法をマルチセンターアンサンブル予報に応用する。

③ 予報大外し事例の抽出

台風進路予報における大外し事例を抽出し、その原因調査を行った。予報誤差を極端に大きくする要因として、北西太平洋域における代表的な指向流（太平洋高気圧縁辺流、偏西風、貿易風など）の表現の適切さがあるが、この他、モンスーントラフの表現の適切さも大きな要因であることが新たに分かった。すなわち、モンスーントラフが作る低気圧性循環による指向流の表現、またモンスーントラフ内で発達する熱帯低気圧の大きさが、それぞれ進路予報に大きな影響を与えている。また、海外の研究者と協力して、進路予報の大外し事例に関するレビュー論文を出版した。

[その他]

防災・交通分野に資するその他の研究として、以下の成果を得た。

台風予報の参考研究として、大気モデルによる将来温暖化実験の解析を行い、将来の温暖化に伴う日

本（中緯度）域の台風移動速度の低下という防災上大変重要な知見を得た。本研究論文は著名国際学術誌に掲載され、報道発表を行い大きな反響を得た。

更に、過去40年の観測データを用いて、日本に接近する台風の特徴の変化を調査した。その結果、太平洋側へ接近する台風の増加、より強い強度での接近の増加、移動速度の低下が判明した。原因として、日本に低速度で接近し易くする気圧配置変化、また、台風の発達を強める海面水温上昇が示唆された。

台風の移動速度の低下は、過去40年間、北西太平洋中緯度において、9月に著しいことが更なる観測解析で判明し、太平洋十年規模振動と地球温暖化がその主な原因であることが、過去の温暖化の有無を考慮したシミュレーションから示された。将来の温暖化のシミュレーションでは、熱帯低気圧を移動させる指向流が温暖化で弱くなることが、秋の熱帯低気圧の移動速度低下の原因であると示された。M課題（地球システム・海洋モデリング：全球大気海洋研究部）と連携して、台風が最大発達強度になる環境条件を調査した結果、特に海洋の冷水渦と陸地の存在が最大発達強度のタイミングを決める事が判明した。

数値予報ガイドランスの一つである視程は、航空機など交通機関の運行に重要な気象要素である。航空交通量が増加する中、都市部における視程の実態を把握するため、東京で観測された視程の気候学的特徴を調査した。視程の低下はエアロゾル粒子及び相対湿度に依存し、低視程日数は年々減少していることが明らかとなった。その要因として、都市部の乾燥化と大気質の改善が示唆された。

数年規模の防災・社会経済に資する情報として、気象研地球システムモデルを用いて大規模火山噴火の気候及び生態系への影響（寒冷乾燥化、中高緯度の植物生産減少等）を解析し、論文として公表した。

（副課題3）

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

気象ビジネスコンソーシアムや研究会への出席、気候リスク管理の実践機関並びに研究機関の個別訪問などを通して、気候リスク管理の需要について調査を行い、今後、共同研究を推進すべき機関、研究者、需要のあるデータ種類などを調査した。また、気候変動分野におけるユーザーの要望について、外部研究プロジェクトから情報収集を行った。

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

メソアンサンブル予報を用いた気候リスク管理について二つの共同研究契約を締結し、研究を推進している。再生可能エネルギーに関する共同研究では、2019年を対象に解析を開始し、発電ポテンシャル予測について、アンサンブル情報を利用することで予測精度が向上することが示され、さらに機械学習を用いるとメソアンサンブル予報のみの予報成績を上回る結果が得られることがわかった。洪水予測については、2019年台風第19号を対象として洪水予測実験を行い、氾濫ポテンシャルの予測が実際の氾濫箇所とよく一致することが示された。今後の研究の推進のため、大量のメソアンサンブル予報データを本庁システムから気象研へ転送するための検討を行っている。

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

利活用の裾野を拡大するために、WMOが提案している最高・最低気温と降水量のみを用いた34種の産業分野別気候指標について、国内の気象官署及びアメダスデータ地点データを用いて算定し、地域分布特性について図化を行い、地域特性を明らかにした。また、季節予報に基づく大規模場の気候指標を用いて主要穀物収量の偏差予測を行った。予測スキルのある領域がいくつか示され、その主要な気候指標は穀物と地域によって異なることが示された。

（3）当初計画からの変更点（研究手法の変更点等）

（副課題2）

台風予報の参考研究として、大気モデルを用いた将来温暖化実験結果の解析及び観測に基づいた過去40年間の台風経路の解析も実施した。台風移動速度の変化や太平洋側への台風接近数の変化などに関する成果が得られている。

（4）成果の他の研究への波及状況

（副課題1）

・地域気候予測モデル（NHRCM）による予測結果や現在気候における温暖化影響の検出などの研究成果は、本庁気候変動対策推進室と連携した「日本の気候変動2020」（令和2年12月公表）の作成に活

用された。(本庁業務への貢献)

- ・地域気候予測モデル (NHRCM) による予測結果は、地球環境情報プラットフォーム構築推進プログラムによるデータ統合・解析システム (DIAS) や国立環境研究所が運営する気候変動適応情報プラットフォーム (A-PLAT) に登録しており、各種の研究機関等による気候変動解明や気候変動適応の研究、さらには地方自治体の適応計画策定等に役立てられている。(気候変動適応研究への波及)

- ・asuca をベースとした開発中の地域気候モデルの性能評価結果は P 課題と共有されており、P 課題の副課題 1 において asuca を用いた各種数値実験を行う際の基礎資料として役立てられる。また、同モデルは、文部科学省「統合的気候モデル高度化研究プログラム」のテーマ C「統合的気候変動予測」における日本域の地域気候予測実験にも活用される予定となっており、そのための予備的実験が進められている。

- ・地域気候予測モデル (NHRCM) は、電力中央研究所との共同研究において先方が保有する地域気候モデルによるシミュレーションとの比較に用いられ、その解析結果は電力設備の温暖化影響評価や対策立案のための基礎資料として活用される。また、学術振興会「二国間交流事業共同研究 (代表: 谷田貝亜紀代 弘前大学教授)」におけるトルコを対象とした将来気候予測実験にも用いられ (弘前大学招聘によるトルコの研究者を気象研究所で受入れ)、その結果は、地球温暖化に伴うトルコの河川流出量及び水力発電量への影響評価のために役立てられる。

(副課題 2)

- ・マルチセンターアンサンブル手法などの研究成果は、既に一部が現業の台風予報に導入され (本庁と共同のプロジェクトチームでは T 課題と連携)、また、海外の気象機関の台風予報を改善するための世界気象機関のプロジェクトでも役立てられる見込みである (当課題の山口氏は計画立案の共同代表)。

- ・M 課題と連携して得られた知見 (台風が最大発達強度になる環境条件) は、M 課題の海洋モデリングにも活かされる。

- ・台風アンサンブル予報等に関する知見は、WXBC セミナー等を通じて副課題 3 や本庁情報利用推進課が推進している気象・気候情報の産業分野での利活用促進にも役立てられた。

- ・地球システムモデルによる火山噴火寒冷化等の解析結果は、C 課題 (気候・地球環境変動) に寄与するほか、本庁気候情報課の異常気象解析業務にも役立てられる。

(5) 事前評価の結果の研究への反映状況

事前評価では、特に副課題 2 と副課題 3 について、研究課題を明確化すべきとの意見をいただいた。その指摘に従い、計画の対象と内容をより具体化したうえで研究を開始した。

また、「産業利用のための気象情報の受け手側の意見をよく聞く必要がある、積極的に利用者との交流を図るべき」という点について、副課題 3 では様々な機会を利用して利用者の要望の収集を行っている。

今後の研究の進め方

(副課題 1)

①気象庁の現業で使用されている数値モデル (asuca) の地域気候モデル化のために導入したスキーム (スペクトルナッジング及び陸面過程) の性能を評価する。

②パリ協定の 2°C 目標に相当する RCP2.6 や RCP4.5 といった気候シナリオを用いた予測結果の分析を実施すると共に、現状を上回る温暖化対策を行わない場合に相当する RCP8.5 シナリオを使った予測結果との比較を行う。

③地上気温、降水量以外の物理量をも対象として、温暖化予測シミュレーションで得られた結果の分析を行い、変化をもたらす物理的メカニズムについての解析を行う。

(副課題 2)

①アンサンブル予報の利活用: 台風進路の気象学的根拠やアンサンブル予報を用いた不確実性等の定量化プロダクトを作成し、進路予報における予報根拠の拡充を図る。これらは、台風進路の診断的研究を行っている岐阜大学や、台風の予測可能性研究を行っている琉球大学とも連携して進めていく。

②予報ガイドランス: 衛星データを用いた台風強風域予測の利用可能性の調査や、台風発生予測ガイドランスの開発と改良を進める。また、台風予報作業において重要となる気象学的根拠の定量化に関して、開発したプロダクトを多くの事例で検証して、その利用可能性について評価する。これらは、本庁予報課のほか、横浜国立大学や米国のハリケーンセンターとも連携して研究を進めていく。

③過去の大外し事例の抽出と原因分析を引き続き行い、予報不確実性の定量化プロダクトの改良に活かす。

(副課題3)

①気候リスク管理の需要についての情報収集を引き続き実施する共に、調査・収集した情報を取りまとめて、モデル開発者、データ作成者に共有していくと共に、今後の共同研究を進める研究機関の選定と共同研究内容について議論を行う。

②メソアンサンブル予報を用いた気候リスク管理については、太陽光発電ポテンシャル予測の研究を進展させると共に、風力発電ポテンシャル予測研究を開始する。洪水予測については、準リアルタイムでの予測ができるシステム構築と予測精度について調査する。

③簡便な気候指標の利活用については、気候指標の地理的分布の気候学解釈を進めると共に、気候指標による気候リスク管理の可能性調査を選定した幾つかの産業分野で実施し、その結果を分野専門家と議論して、更なる研究につなげていく。

自己点検

(1) 到達目標に対する進捗度

(副課題1)

新モデルの導入準備は計画通り進み、既存モデルの改良も行った。また、温暖化顕在化の検証や、降水量の再現・予測結果に対する信頼性の評価、温暖化予測結果に対する物理的メカニズムの分析についても順調に実施している。

(副課題2)

新手法による台風進路予報円(プロダクト)の開発、現業化が達成され、新たな台風移動診断手法の開発の開始や、環境場ごとの台風発生予測可能性の調査を行う等、順調に進められている。

(副課題3)

気候リスク管理の需要調査や産業別気候指標の地域分布特性評価など、おおむね順調に進んでいる。また、メソアンサンブル予報を用いた気候リスク管理も良好な結果が得られている。

(2) 到達目標の設定の妥当性

(副課題1)

地球温暖化が顕在化するなか、地方自治体レベルでの温暖化適応計画策定に必要な地域気候予測データの高度化・高精度化や、予測の不確実性の定量化や将来変化の原因の説明が求められていることから、適切なものとする。

(副課題2)

主に本庁予報課における防災気象情報の高度化に資する研究開発を行うことを目標としており、社会的ニーズにも合致して適切なものとする。

(副課題3)

産業界で気象情報を利活用する機運が高まっている中、気象ビジネスの創出につなげるための先進的な事例の創出は時宜にかなったものとする。

(3) 研究の効率性(実施体制、研究手法等)について

(副課題1)

応用気象研究部のメンバーの他に、気象予報研究部のメンバーを加えた実施体制をとっている。大気の物理過程の解明とモデル化に関する研究(P課題)との連携分野としては、次世代地域気候モデル及び物理過程の開発の部分が挙げられ、ソースコードレベルの情報交換を通して効率的に開発を行っている。地球システム・海洋モデリングに関する研究(M課題)、気候・地球環境変動の要因解明と予測に関する研究(C課題)とは、地域気候モデルの境界条件である全球モデルの出力結果の供給を通して連携している。また、予測の不確実性の評価においては多メンバーのアンサンブル予測データ、メカニズム解析には高解像度モデルによる予測データといった、対象によってデータを使い分ける研究手法をとることで効率的に研究を遂行している。

(副課題2)

他の課題(T課題, M課題)や他の研究機関と連携して研究を進めている。実質的な担当者は少数であるため、研究対象は主として本庁予報課への貢献を目的とした台風予報に絞っている。この分野の気

象学に熟達した担当者が観測やモデルの解析を行うことで、優れた成果（進路予報改良、経年変動・将来変化の解明、予報楕円の評価等）を上げており、効率的に研究を遂行している。

（副課題3）

特にメソアンサンブル予報の活用に関しては、共同研究を活用して、先進的な研究を進めている。副課題の対象となりうる産業が幅広いので、研究体制を考慮すると、産業を適切に選択して研究を進めることが重要と認識している。

（4）成果の施策への活用・学術的意義

（副課題1）

地域気候モデルを用いた日本の将来気候予測データの解析結果は、本庁が文部科学省と共同で公表した「日本の気候変動2020」に活用されている。また、DIASやA-PLATを通じて予測データが提供され、各種の研究機関等による気候変動解明や気候変動適応の研究、さらには地方自治体の適応計画策定等に役立てられている。各種大気現象、各種気象要素における将来変化の物理的メカニズムを調べていく中で、将来変化という視点だけではなく、現在に存在する現象そのものの理解が深まるという意味で気象学に貢献する。

（副課題2）

アンサンブル予報プロダクト（マルチセンターアンサンブル台風予報円）や予報ガイダンスの開発は、防災気象情報の拡充だけでなく、大量のデータから必要な情報を抽出する研究であるため、この手法は国土交通省の生産革命プロジェクトに貢献する。また国際的には、世界気象機関の推進するTIGGE(The International Grand Global Ensemble, 海外の気象局を含む全球アンサンブル予報)等に貢献する。更に、アンサンブル予報を含む数値予報データの利用に関する研究（台風の将来変化の解明、予報楕円の評価等）は、気象学の発展だけでなく、本庁での業務への応用を通じて全国及び地域社会の的確な防災・適応策の策定に寄与する。

（副課題3）

再生可能エネルギーポテンシャルの予測、確率洪水予測の共同研究は、いずれも業務への応用を目指したもので、社会活動の向上、防災に直接貢献し、アンサンブル予報の高度利用という点で気象学に貢献する。また、簡便な産業分野別気候指標と管理手法開発は、気象・気候リスクを管理することで社会活動の効率化が期待され、応用気象分野の裾野を拡大することに寄与する。

（5）総合評価

各副課題において、当初計画で予定した程度、またはそれ以上の成果が得られており、また、それぞれ社会的・学術的要望を踏まえて研究を進めていることから、今後も継続して計画通りに研究を進める意義は高い。

研究成果リスト

（1）査読論文：45件

1. Iizumi, T., Y. Takaya, W. Kim, T. Nakaegawa, S. Maeda, 2021: Global within-season yield anomaly prediction for major crops derived using seasonal forecasts of large-scale climate indices and regional temperature and precipitation. *Weather and Forecasting*, **36**, 285-299.
2. Ito, R., T. Nakaegawa, and I. Takayabu, 2020: Comparison of regional characteristics of land precipitation climatology projected by an MRI-AGCM multi-cumulus scheme and multi-SST ensemble with CMIP5 multi-model ensemble projections. *Progress in Earth and Planetary Science*, **7**.
3. Murata, A., S. I. Watanabe, H. Sasaki, H. Kawase, and M. Nosaka, 2020: Assessing goodness of fit to gamma distribution and estimating future projection on daily precipitation frequency using regional climate model simulations over Japan with and without the influence of tropical cyclones. *Journal of Hydrometeorology*, **21**, 2997-3010.
4. Yamaguchi, M., and S. Maeda, 2020: Slowdown of typhoon translation speeds in mid-latitudes in September influenced by the Pacific Decadal Oscillation and global warming. *Journal*

- of the Meteorological Society of Japan*, **98**, 1321-1334.
5. Nakaegawa, T., T. Kobashi, and H. Kamahori, 2020: Characteristics of the extreme value statistics of annual maximum monthly precipitation in East Asia calculated by an earth system model of intermediate complexity. *Atmosphere*, **11**, 1273.
 6. Qin, X., M. Yamaguchi, N. Usui, and N. Hirose, 2020: Environmental conditions determining the timing of the lifetime maximum intensity of tropical cyclones over the western North Pacific and their frequency of occurrence. *Advances in Atmospheric Sciences*. (submitted)
 7. Liang, M., J. C. L. Chan, J. Xu, and M. Yamaguchi, 2020: Numerical Prediction of Tropical Cyclogenesis Part I: Evaluation of Model Performance. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **147**, 1626-1641.
 8. Tang, K., J. C. L. Chan, and M. Yamaguchi, 2020: Large Tropical Cyclone Track Forecast Errors of Global Numerical Weather Prediction Models in western North Pacific Basin. *Meteorological Applications*. (submitted)
 9. Yamada, H., K. Ito, K. Tsuboki, T. Shinoda, T. Ohigashi, M. Yamaguchi, T. Nakazawa, N. Nagahama, and K. Shimizu, 2020: The Double Warm-Core Structure of Typhoon Lan (2017) as Observed through the First Japanese Eyewall-Penetrating Aircraft Reconnaissance. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. (submitted)
 10. Ito, R., T. Ose, H. Endo, R. Mizuta, K. Yoshida, A. Kitoh, T. Nakaegawa, 2020: Seasonal characteristics of future climate change over Japan and the associated atmospheric circulation anomalies in global model experiments. *Hydrological Research Letters*, **14**, 130-135.
 11. Martínez M. M., T. Nakaegawa, R. Pinzón, S. Kusunoki, R. Gordón, and J. E. Sanchez-Galan, 2020: Using a Statistical Crop Model to Predict Maize Yield by the End-Of-Century for the Azuero Region in Panama. *Atmosphere*, **11**, 1097.
 12. Kawase, H., A. Murata, K. Yamada, T. Nakaegawa, R. Ito, R. Mizuta, M. Nosaka, S. Watanabe, H. Sasaki, 2020: Regional characteristics of future changes in snowfall in Japan under RCP2.6 and RCP8.5 scenarios. *SOLA*, **17**.
 13. Kawase, H., M. Yamaguchi, Y. Imada, S. Hayashi, A. Murata, T. Nakaegawa, T. Miyasaka, I. Takayabu, 2020: Enhancement of extremely heavy precipitation induced by Typhoon Hagibis (2019) due to historical warming. *SOLA*, **17A**, 7-13.
 14. Yamaguchi, M., and S. Maeda, 2020: Increase in the Number of Tropical Cyclones Approaching Tokyo Since 1980. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **98**, 775-786.
 15. Ohba, M. and H. Kawase, 2020: Rain-on-Snow events in Japan as projected by a large ensemble of regional climate simulations. *Climate Dynamics*.
 16. Sheau Tieh Ngai, Hidetaka Sasaki, Akihiko Murata, Masaya Nosaka, Jing Xiang Chung, Liew Juneng, Supari, Ester Salimun, and Fredolin Tangang, 2020: Extreme Rainfall Projections for Malaysia at the End of 21st Century Using the High Resolution Non-Hydrostatic Regional Climate Model (NHRCM). *SOLA*, **16** 卷, 132-139.
 17. Kawabata, Y., and M. Yamaguchi, 2020: Probability ellipse for tropical cyclone track forecasts with multiple ensembles. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **98**, 821-833.
 18. Kwiatkowski, L., O. Torres, L. Bopp, K. Toyama, H. Tsujino, 他23名, 2020: Twenty-first century ocean warming, acidification, deoxygenation, and upper-ocean nutrient and primary production decline from CMIP6 model projections. *Biogeosciences*, **17**, 3439-3470.
 19. Miyasaka, T., H. Kawase, T. Nakaegawa, Y. Imada, and I. Takayabu, 2020: Future projections of heavy precipitation in Kanto and associated weather patterns using large ensemble

- high-resolution simulations. *SOLA*, **16**, 125-131.
20. Fredolin Tangang, et al., 2020: Projected future changes in rainfall in Southeast Asia based on CORDEX-SEA multi-model simulations. *Climate Dynamics*, **55**, 1247-1267.
 21. Cha, E. J., T. R. Knutson, T. C. Lee, M. Ying, and T. Nakaegawa, 2020: Third Assessment on Impacts of Climate Change on Tropical Cyclones in the Typhoon Committee Region - Part II: Future Projections. *Tropical Cyclone Research and Review*, **9**, 75-86.
 22. Nosaka, M., M. Ishii, H. Shiogama, R. Mizuta, A. Murata, H. Kawase, and H. Sasaki, 2020: Scalability of future climate changes across Japan examined with large-ensemble simulations at +1.5 K, +2 K, and +4 K global warming levels. *Progress in Earth and Planetary Science*.
 23. Ito, R., H. Shiogama, T. Nakaegawa, and I. Takayabu, 2020: Uncertainties in climate change projections covered by the ISIMIP and CORDEX model subsets from CMIP5. *Geoscientific Model Development*, **13**, 859-872.
 24. Lee, T. C., T. R. Knutson, T. Nakaegawa, M. Ying, and E. J. Cha, 2020: Third assessment on impacts of climate change on tropical cyclones in the Typhoon Committee Region - Part I: Observed changes, detection and attribution. *Tropical Cyclone Research and Review*, **9**, 1-22.
 25. Kawase, H., T. Yamazaki, S. Sugimoto, T. Sasai, R. Ito, T. Hamada, M. Kuribayashi, M. Fujita, A. Murata, M. Nosaka and H. Sasaki, 2020: Changes in extremely heavy and light snow-cover winters due to global warming over high mountainous areas in central Japan. *Progress in Earth and Planetary Science*, **7**.
 26. Fudeyasu, H., R. Yoshida, M. Yamaguchi, H. Eito, C. Muroi, S. Nishimura, K. Bessho, Y. Oikawa, and N. Koide, 2020: Development Conditions for Tropical Storms over the Western North Pacific Stratified by Large-scale Flow Patterns. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **98**, 61-72.
 27. Tang, K., J. C. L. Chan, and M. Yamaguchi, 2020: Effects of the Outer Size on Tropical Cyclone Track Forecasts. *Meteorological Applications*.
 28. Nakagawa, Y., Y. Onoue, S. Kawahara, F. Araki, K. Koyamada, D. Matsuoka, Y. Ishikawa, M. Fujita, S. Sugimoto, Y. Okada, S. Kawazoe, Sh. Watanabe, M. Ishii, R. Mizuta, A. Murata, and Hiroaki Kawase, 2020: Developments of a system for efficient content-based retrieval to analyze Large volume climate data. *Progress in Earth and Planetary Science*.
 29. Kawase, H., Y. Imada, H. Tsuguti, T. Nakaegawa, N. Seino, A. Murata, and I. Takayabu, 2020: The Heavy Rain Event of July 2018 in Japan enhanced by historical warming. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **101**, S109-S114.
 30. Yamaguchi, M., J. C. L. Chan, I.-J. Moon, K. Yoshida, and R. Mizuta, 2020: Global warming changes tropical cyclone translation speed. *Nature Communications*, **11**, 47.
 31. Shimada, U., M. Yamaguchi, and S. Nishimura, 2020: Is the Number of Tropical Cyclone Rapid Intensification Events in the Western North Pacific Increasing?. *SOLA*, **16**, 1-5.
 32. Sasai T., H. Kawase, Y. Kanno, J. Yamaguchi, S. Sugimoto, T. Yamazaki, H. Sasaki, M. Fujita, and T. Iwasaki, 2019: Future projection of extreme heavy snowfall events with a 5 - km large ensemble regional climate simulation. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, **124**, 13975-13990.
 33. Fukuda, J., and M. Yamaguchi, 2019: Determining 70 Percent Probability-Circle Radii of Tropical Cyclone Track Forecasts with Multiple Ensembles. *SOLA*, **15**, 250-256.
 34. Camargo, S. J., J. Camp, R. L. Elsberry, P. A. Gregory, P. J. Klotzbach, C. J. Schreck III, A. H. Sobel, M. J. Ventrice, F. Vitart, Z. Wang, M. C. Wheeler, M. Yamaguchi, and R. Zhan, 2019: Tropical Cyclone Prediction on Subseasonal Time-Scales. *Tropical Cyclone*

- Research and Review*, **8**, 150-165.
35. Magnusson, L., J. D. Doyle, W. A. Komaromi, F. Zhang, R. Torn, C. K. Tang, C. L. Chan, and M. Yamaguchi, 2019: Advances in understanding difficult cases of track forecasts. *Tropical Cyclone Research and Review*, **8**, 109-122.
 36. Titley, H. A., M. Yamaguchi, L. Magnusson, 2019: Current and potential use of ensemble forecasts in operational TC forecasting: results from a global forecaster survey. *Tropical Cyclone Research and Review*, **8**, 166-180.
 37. Watanabe, S. I., A. Murata, H. Sasaki, H. Kawase, and M. Nosaka, 2019: Future Projection of Tropical Cyclone Precipitation over Japan with a High-Resolution Regional Climate Model. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **97**, 805-820.
 38. Obata, A., and Y. Adachi, 2019: Earth system model response to large midlatitude and high-latitude volcanic eruptions. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, **Volume 124**, **Issue 7**, 1865-1886.
 39. Kawase, H., Y. Imada, H. Sasaki, T. Nakaegawa, A. Murata, M. Nosaka, and I. Takayabu, 2019: Contribution of Historical Global Warming to Local - Scale Heavy Precipitation in Western Japan Estimated by Large Ensemble High - Resolution Simulations. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, **124**, 6093-6103.
 40. Nosaka, M., H. Kawase, H. Sasaki, and A. Murata, 2019: Influence of the Temporal Resolution of Sea Surface Temperature on Winter Precipitation over the Coastal Area of the Sea of Japan. *SOLA*, **15**, 107-112.
 41. Murata, A., S. I. Watanabe, H. Sasaki, H. Kawase, and M. Nosaka, 2019: The development of a resolution-independent tropical cyclone detection scheme for high-resolution climate model simulations. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **97**, 519-531.
 42. 川端康弘, 梶野瑞王, 財前祐二, 足立光司, 田中泰宙, 清野直子, 2021: 東京都心における視程の変化. *天気 (論文・短報)*, **68**, 5-12.
 43. 仲江川敏之, 小端拓郎, 釜堀弘隆, 2020: 中程度の複雑さの地球システムモデルによって算定された日本域年最大月降水量の極値統計の性質. *土木学会論文集*, **65**. (submitted)
 44. 伊藤昌資, 菅野豊, 大八木豊, 西澤諒亮, 川瀬宏明, 佐々井崇博, 杉本志織, 川崎将生, 中北英一, 2020: 気候変動が淀川水系の渇水リスクに及ぼす影響. *水文・水資源学会誌*, **33**, 83-97.
 45. 吉野純, 山本康平, 村田昭彦, 小林智尚, 2019: 直接ダウンスケーリングによる伊勢湾における可能最大高潮の将来変化. *土木学会論文集*, **75**, 1189-1194.

(2) 査読論文以外の著作物 (翻訳、著書、解説) : 6 件

1. Tinumbang, A.F.A, K. Yorozu, Y. Tachikawa, Y. Ichikawa, H. Sasaki, T. Nakaegawa, 2020: Impacts of model structures and soil parameters on runoff characteristics in land surface models . *土木学会論文集(水工学)*, **76**.
2. Nakaegawa, T., R. Pinzon, J. Fabrega, J. A. Cuevas, H. A. De Lima, E. Cordoba, K. Nakayama, J. I. Batista Lao, A. Lau Melo, D. A. Gonzalez, S. Kusunoki, 2019: Seasonal changes of the diurnal variation of precipitation in the upper Río Chagres basin, Panamá. *PLOS ONE*, **14**, e0224662.
3. Tinumbang, A.F.A, K. Yorozu, Y. Tachikawa, Y. Ichikawa, H. Sasaki, T. Nakaegawa, 2019: Analysis of runoff characteristics generated by land surface models and their impacts on river discharge. *Journal of Japan Society of Civil Engineering, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, **75**, I271-I276.
4. Fukuda, J. and M. Yamaguchi, 2019: Determining Probability-Circle Radii of Tropical Cyclone Track Forecasts with Multiple Ensembles. *RSMC Tokyo - Typhoon Center Technical Review*, **21**, 1-19.
5. 仲江川敏之, 日比野研志, 高藪 出, 2019: 気候アナログで実感する今世紀末の温暖化状況下に

おけるロシア主要7都市の気候. 土木学会論文集(水工学), **75**, I1045-I1050.

6. 山崎剛, 佐々井崇博, 川瀬宏明, 杉本志織, 大楽浩司, 伊東瑠衣, 佐々木秀孝, 藤田実季子, 2019: 5km 力学的ダウンスケーリングデータセット(SI-CAT DDS5TK)の概要. シミュレーション学会誌, **38**, 145-149.

(3) 学会等発表 : 72 件

1. Takamatsu, T., H. Ohtake, T. Oozeki, T. Nakaegawa, and Y. Honda, Study on a Regional Solar Irradiance Forecast by Ensemble Approaches Based on a SVR with MEPS, The 30th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-30), 2020年11月, Korea, Jeju&オンライン併用
2. Mori, Y, S. Wakao, H. Ohtake, T. Oozeki, T. Takamatsu, Y. Honda, and T. Nakaegawa, Fundamental Study on Use of MEPS Solar Irradiance Data, The 30th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-30), 2020年11月, Korea, Jeju &オンライン併用
3. Ohtake H., T. Oozeki, General issues of Photovoltaic power forecasts for energy management in Japan, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
4. Yamaguchi, M., J. C. L. Chan, I.-J. Moon, K. Yoshida, and R. Mizuta, Global warming changes tropical cyclone translation speed, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
5. Nakagawa, Y., Y. Onoue, S. Kawahara, F. Araki, K. Koyamada, D. Matsuoka, Y. Ishikawa, M. Fujita, S. Sugimoto, Y. Okada, S. Kawazoe, S. Watanabe, M. Ishii, R. Mizuta, A. Murata, H. Kawase, A Content-Based Database System for Large Volume Climate Data, AGU Fall Meeting, 2019年12月, 米国, サンフランシスコ
6. Nakagawa, Y., Y. Onoue, S. Kawahara, F. Araki, K. Koyamada, D. Matsuoka, Y. Ishikawa, M. Fujita, S. Sugimoto, Y. Okada, S. Kawazoe, S. Watanabe, M. Ishii, R. Mizuta, A. Murata, H. Kawase, A content-based database system for large volume climate data, VizAfrica Botswana 2019, 2019年11月, ボツワナ, ハボローネ
7. Yamaguchi, M., J. C. L. Chan, I.-J. Moon, K. Yoshida, and R. Mizuta, Tropical cyclone translation speed in a warmed climate, 2019 TCCIP International Workshop on Climate Change, 2019年10月, 中国, 台北
8. Kawase, H., T. Yamazaki, T. Sasai, S. Sugimoto, M. Fujita, A. Murata, H. Sasaki, and N. Nosaka, Future changes in snowfall and snow cover at high Japanese mountain ranges, International Conference on Regional Climate-CORDEX 2019, 2019年10月, China, Beijing
9. Yamaguchi, M., and H. Yu, Enhanced cooperation between research and operational fields, Second Meeting of the Working Group on Meteorology of the Typhoon Committee, 2019年10月, 東京
10. Nakagawa, Y., Y. Onoue, S. Kawahara, F. Araki, K. Koyamada, D. Matsuoka, Y. Ishikawa, M. Fujita, S. Sugimoto, Y. Okada, S. Kawazoe, S. Watanabe, M. Ishii, R. Mizuta, A. Murata, H. Kawase, A content-based retrieval system for conventional and machine learning methods to analyze large volume climate data, The 9th International Workshop on Climate Informatics, 2019年10月, フランス, パリ
11. Nakaegawa, T., Future climate projections and HPC in meteorology, the workshop on applications of simulations and CUDA programing: studies at atomic scale, climate and optical phenomena, 2019年9月, Panama, Panama City
12. Yamaguchi, M., Review of activities on challenge 4 -Spatio-temporal post-processing & applications-, Fifth meeting of the WMO/WWRP PDEF working group, 2019年9月, 米国, ボルダー
13. Yamaguchi, M., Pilot Project for Seamless GDPFS in the Asian Pacific Aimed for Better Typhoon Forecast and Warning, Fifth meeting of the WMO/WWRP PDEF working group, 2019年9

月, 米国, ボルダーク

14. Kawase, H., A. Murata, H. Sasaki, N. Nosaka, T. Sasai, T. Yamazaki, S. Sugimoto, and M. Fujita, Future projection of snowfall and snow depth in Japan using non-hydrostatic regional climate model, Latsis Symposium, 2019年8月, スイス, チューリッヒ
15. Murata, A., S. I. Watanabe, H. Sasaki, H. Kawase, and M. Nosaka, Assessing uncertainties in precipitation in regional climate model simulations with the influence of tropical cyclones based on statistical distributions, the 27th IUGG General Assembly, 2019年7月, カナダ, モントリオール
16. Yamaguchi, M., Recent Research and Development at JMA to Improve Typhoon Forecasts, The International Workshop on Tropical Cyclone Ocean Interaction in the Northwest Pacific 2019, 2019年6月, 韓国, 済州
17. Kawase, H., A. Murata, M. Nosaka, H. Sasaki, R. Ito, S. Watanabe, Y. Imada, T. Nakaegawa, and I. Takayabu, Future climate projections over East Asia and Japan using MRI-AGCM and NHRCM, International Workshop for CORDEX East Asia, 2019年4月, Korea, Seogwipo
18. 川瀬宏明, 「地球温暖化で日本の雪が変わる !?', 立山カルデラ砂防博物館講座, 2021年3月, 富山県
19. 川瀬宏明, 今田由紀子, 山口宗彦, 村田昭彦, 仲江川敏之, 高薮出, 林修吾, 宮坂 貴文, 近年の気温上昇が令和元年東日本台風の大雨に与えた影響+ α , 気象キャスターネットワークオンライン勉強会, 2021年2月, オンライン
20. 山口宗彦, 前田修平, 日本に接近する台風の過去40年の変化と移動速度の鈍化における太平洋十年規模振動の寄与, 令和2年度日本気象学会長期予報研究連絡会, 2021年1月, オンライン
21. 川瀬宏明, 今田由紀子, 近年の豪雨と地球温暖化 ~最新のイベント・アトリビューション研究の紹介~, 2020年度日本気象学会関西支部第2回例会, 2020年12月, 岡山市
22. 川瀬宏明, 日本の雪とSNOW LIFEのいまとこれから, サイエンスアゴラ2020, 2020年11月, オンライン
23. 川瀬宏明, 地域によって異なる地球温暖化に伴う将来の雪の変化, 雪氷防災研究講演会オンライン, 2020年11月, オンライン
24. 川瀬宏明, 日本の山岳域(中部山岳域)の降積雪の実態把握と将来予測, 雲・降水研究会, 2020年11月, オンライン
25. 山口宗彦, 過去40年で太平洋側に接近する台風が増えている, 日本気象学会2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
26. 川端康弘, 山口宗彦, 筆保弘徳, 吉田龍二, 複数アンサンブルを用いた台風発生予測の可能性, 日本気象学会2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
27. 川瀬宏明, 山口宗彦, 今田由紀子, 林修吾, 村田昭彦, 仲江川敏之, 高薮出, 宮坂 貴文, 近年の気温上昇によって強化された台風Hagibisの大雨, 日本気象学会2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
28. 村田昭彦, 野坂真也, 佐々木秀孝, 川瀬宏明, 日本の降水頻度の将来変化に対する相対湿度の影響, 日本気象学会2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
29. 山口宗彦, 地球温暖化が台風に及ぼす影響 ~これまでとこれから~, 統合的気候モデル高度化研究プログラムオンライン講演会, 2020年10月, オンライン
30. 大竹秀明, PVシステムの発電予測技術に関する研究の取組, 福島県再生可能エネルギー関連産業推進研究会 令和2年度第1回太陽光分科会, 2020年9月, 郡山市・オンライン
31. 高松尚宏, 大竹秀明, 大関崇, 仲江川敏之, 本田 有機, MEPSデータを用いたPV発電予測の基礎検討, 電気学会 令和2年電力・エネルギー部門大会, 2020年9月, オンライン
32. 森友輔, 若尾真治, 大竹秀明, 大関崇, 高松尚宏, 仲江川敏之, 本田有機, MEPSデータとJITModelingによる翌日日射量の信頼区間推定に関する基礎的検討, 電気学会 令和2年電力・エネルギー

ギー部門大会, 2020年9月, オンライン

33. 大竹秀明, 大関崇, 高松尚宏, 森友輔, 若尾真治, 本田有機, 仲江川敏之, メソアンサンブル予報による日射量予測の初期解析, 電気学会 令和2年電力・エネルギー部門大会, 2020年9月, オンライン
34. 山口宗彦, 気象データの利用におけるリスクマネジメント ~さまざまなアンサンブル予報の形態~, 令和2年度第1回WXBCセミナー, 2020年8月, オンライン
35. 大竹秀明, 大関崇, 山口順之, 井村順一, 研究用太陽光発電出力推定・予測データのオープンデータ化, 第39回エネルギー・資源学会研究発表会, 2020年7月, オンライン
36. 大竹秀明, 大関崇, 井村順一, 太陽光発電オープンデータ:エネルギーマネジメント分野への活用, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
37. 川瀬宏明, 村田昭彦, 山田賢, 仲江川敏之, 伊東瑠衣, 水田亮, 野坂真也, 渡邊俊一, 佐々木秀孝, 地球温暖化に伴う将来の降雪・積雪変化の地域特性, 降雪・積雪系オンラインワークショップ2020, 2020年7月, オンライン
38. 仲江川敏之, 佐々木秀孝, 楠昌司, R. Pinzon, J. Fabrega, and J. S. Galan, MRI-AGCM, NHRCM を用いたパナマでの気候変化予測協力, 日本気象学会2020年度春季大会, 2020年5月, オンライン
39. 川端康弘, 田中泰宙, 財前祐二, 梶野瑞王, 足立光司, 東京と熊谷における視程の経年変化, 日本気象学会2020年度春季大会, 2020年5月, オンライン
40. 佐々木秀孝, 村田昭彦, 川瀬宏明, 野坂真也, 仲江川敏之, 鬼頭昭雄, 長沢昭子, NHRCM を用いたアジア・太平洋地域における気候変動予測実験に関する共同研究について, 日本気象学会2020年度春季大会, 2020年5月, オンライン
41. 山口宗彦, 前田修平, 1980年以降東京に接近する台風が増加している, 日本気象学会2020年度春季大会, 2020年5月, 川崎市
42. 野坂真也, 石井正好, 水田亮, 村田昭彦, 川瀬宏明, 佐々木秀孝, 塩竈秀夫, 全球平均気温が1.5°C, 2°C, 4°C上昇した場合の日本周辺の気候変化, 日本気象学会2020年度春季大会, 2020年5月, オンライン
43. 小畑淳, 辻野博之, 将来温暖化時の旱魃・飢饉を地球システムモデルで探る, 日本気象学会2020年度春季大会, 2020年5月, オンライン
44. 川端康弘, 山口宗彦, 台風予報改善のための研究の取り組み, 日本気象学会沖縄支部研究発表会, 2020年2月, 沖縄県国頭郡恩納村
45. 川瀬宏明, 村田昭彦, 野坂真也, 佐々木秀孝, 山崎剛, 佐々井崇博, 杉本志織, 藤田実季子, 伊東瑠衣, 地球温暖化に伴う北アルプスの降積雪の極端化, 第15回立山研究会, 2019年12月, 富山市
46. Yamaguchi, M., 衛星搭載合成開口レーダーによる海上風観測との連携の可能性について, 名古屋大学宇宙地球環境研究所研究集会, 2019年12月, 東京
47. 村田昭彦, 川瀬宏明, 野坂真也, 佐々木秀孝, 地域気候モデルで予測された日本の将来の気候, 環境研究機関研究交流セミナー, 2019年12月, つくば市
48. 山口宗彦, 台風予報改善のための研究の最前線~社会の多様なニーズに応える~, 気象研究所成果発表会, 2019年12月, 東京
49. 川瀬宏明, 山崎剛, 佐々井崇博, 杉本志織, 藤田実季子, 伊東瑠衣, 村田昭彦, 野坂真也, 佐々木秀孝, 地球温暖化に伴う山岳降雪の極端化, 第16回ヤマセ研究会, 2019年11月, 新庄市
50. 川瀬宏明, 異常気象と地球温暖化の関係を解き明かす新手法~イベント・アトリビューション~, 三重県気候講演会『地球温暖化によって 猛暑・豪雨・台風はどうなるのか』, 2019年11月, 津
51. 村崎万代, 石井正好, 水田亮, 遠藤洋和, NHRCM を用いた新タイムスライスダウンスケーリング, 日本気象学会2019年度秋季大会, 2019年10月, 福岡県福岡市
52. 吉野純, 山本康平, 小林智尚, 村田昭彦, 伊勢湾における可能最大高潮の直接ダウンスケーリン

グ実験，日本気象学会 2019 年度秋季大会，2019 年 10 月，福岡県福岡市

53. 村田昭彦，渡邊俊一，佐々木秀孝，川瀬宏明，野坂真也，地域気候モデルによる予測結果から得られた日降水量の統計分布パラメーターの将来変化，日本気象学会 2019 年度秋季大会，2019 年 10 月，福岡県福岡市
54. 山口宗彦，石橋俊之，中澤哲夫，伊藤耕介，山田広幸，大東忠保，清水健作，長浜則夫，篠田太郎，高橋暢宏，坪木和久，気象庁全球数値予測システムと T-PARCII ドロップゾンデを用いた 2018 年台風第 24 号を対象とした観測システム実験，日本気象学会秋季大会，2019 年 10 月，福岡
55. 川端康弘，山口宗彦，台風進路予報における予報楕円，日本気象学会 2019 年度秋季大会，2019 年 10 月，福岡県福岡市
56. 中川友進，尾上洋介，川原慎太郎，荒木文明，小山田耕二，松岡大祐，石川洋一，藤田実季子，杉本志織，岡田靖子，川添祥，渡辺真吾，石井正好，水田亮，村田昭彦，川瀬宏明，大規模アンサンブル気候データの効率的な解析に向けたコンテンツベース検索システム，日本気象学会 2019 年度秋季大会，2019 年 10 月，福岡市
57. 佐々木秀孝，村田昭彦，川瀬宏明，野坂真也，仲江川敏之，利根川流域における NHRCM の解像度による降水再現性の違いについて，日本気象学会 2019 年度秋季大会，2019 年 10 月，福岡
58. 渡邊俊一，辻野博之，村田昭彦，石井正好，大気海洋結合地域気候モデルの開発，日本気象学会 2019 年度秋季大会，2019 年 10 月，福岡市
59. 川瀬宏明，山崎剛，佐々井崇博，杉本志織，藤田実季子，浜田崇，栗林正俊，伊東瑠衣，村田昭彦，野坂真也，佐々木秀孝，1km 力学的ダウンスケーリングから見えた地球温暖化に伴い極端化する中部山岳の降雪・積雪，日本気象学会 2019 年度秋季大会，2019 年 10 月，福岡市
60. 川瀬宏明，宮坂貴文，今田由紀子，仲江川敏之，地球温暖化に伴う日本の極端降水の変化とその要因分析，「グローバルスケールとメソスケールを貫く気象学」研究集会，2019 年 9 月，札幌
61. 川瀬宏明，山崎剛，佐々井崇博，杉本志織，藤田実季子，村田昭彦，野坂真也，佐々木秀孝，地球温暖化による北アルプスの降積雪の極端化，雪氷研究大会（2019・山形），2019 年 9 月，山形市
62. 川瀬宏明，いろんな人をつなげた地球温暖化の研究，第 31 回日本気象学会夏季特別セミナー，2019 年 8 月，土浦市
63. 川瀬宏明，地球温暖化で変わる日本の雪，日本気象学会 2019 年度夏季大会，2019 年 8 月，東京
64. 渡邊俊一，辻野博之，村田昭彦，石井正好，大気海洋結合地域気候モデルの開発，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 最新の観測・モデル・理論研究から捉える日本周辺の気象及び気候変動，2019 年 7 月，岩手県上閉伊郡大槌町
65. 渡邊俊一，辻野博之，村田昭彦，石井正好，大気海洋結合地域気候モデルの開発，第 6 回メソ気象セミナー，2019 年 7 月，三重県伊勢市
66. 山口宗彦，石橋俊之，中澤哲夫，伊藤耕介，山田広幸，大東忠保，清水健作，長浜則夫，篠田太郎，高橋暢宏，坪木和久，気象庁全球数値予測システムと T-PARCII ドロップゾンデを用いた 2018 年台風第 24 号を対象とした観測システム実験，日本地球惑星科学連合 2019 年大会，2019 年 5 月，千葉県千葉市
67. 中川友進，川原慎太郎，荒木文明，松岡大祐，石川洋一，藤田実季子，杉本志織，岡田靖子，川添祥，渡辺真吾，石井正好，水田亮，村田昭彦，川瀬宏明，大規模アンサンブル気候データの効率的な解析に向けたコンテンツベース検索システム，日本地球惑星科学連合 2019 年大会，2019 年 5 月，千葉市
68. 野坂真也，川瀬宏明，村田昭彦，佐々木秀孝，海面水温の時間解像度が日本海沿岸地域の冬季降水に与える影響，日本気象学会 2019 年度春季大会，2019 年 5 月，東京都
69. 山口宗彦，吉田康平，青梨和正，台風の移動速度は遅くなっているか？，日本気象学会 2019 年度春季大会，2019 年 5 月，東京都渋谷区

70. 小畑淳, 辻野博之, 行本誠史, 早魃、飢饉を地球システムモデルで探る, 日本気象学会 2019 年度春季大会, 2019 年 5 月, 東京都渋谷区
71. 川瀬宏明, 津口裕茂, 今田由紀子, 村田昭彦, 野坂真也, 仲江川敏之, 清野直子, 高薮出, 近年の気温上昇が平成 30 年 7 月豪雨に与えた影響, 日本気象学会 2019 年度春季大会, 2019 年 5 月, 東京
72. 村田昭彦, 佐々木秀孝, 川瀬宏明, 野坂真也, 日本の極端降水量の将来変化に対する力学及び熱力学過程の影響 (第二報), 日本気象学会 2019 年度春季大会, 2019 年 5 月, 東京都渋谷区

報道・記事

(副課題 1)

- ・今夏は長梅雨か 激しい雨増加 (コメント), 読売新聞, 2019 年 6 月 16 日
- ・温暖化進み雨量 6%増 西日本豪雨、気象研解析 (コメント), 共同通信, 2019 年 6 月 29 日
- ・「誰があなたの命を守るのか “温暖化型豪雨” の衝撃」データ解析手法のコメント, NHK スペシャル, 2019 年 6 月 30 日
- ・相次ぐ豪雨崩れた常識「長時間」「広域」温暖化の影響も, に「猛烈な雨の頻度 1.6 倍」が引用, 朝日新聞朝刊 7 面, 2019 年 7 月 8 日
- ・温暖化 西日本豪雨に影響, 日本経済新聞朝刊, 2019 年 7 月 12 日
- ・北アルプス、温暖化で降雪量増加も, 読売新聞, 2020 年 4 月 9 日
- ・降雪量 温暖化で極端に 北アルプス、年により増減, 日本経済新聞, 2020 年 4 月 12 日
- ・温暖化のはてな?② 雪が増えるところも, 東京新聞, 2020 年 6 月 24 日
- ・台風雨量 温暖化影響?, 毎日新聞, 2020 年 12 月 26 日
- ・昨年の台風 19 号 温暖化で雨量 13.6%増, 読売新聞, 2020 年 12 月 26 日
- ・降雪 長期的には減少, 産経新聞, 2020 年 12 月 28 日

(副課題 2)

- ・台風の予報円の技術開発について, 福島テレビ (放映有り), 2019 年 8 月 6 日
- ・地球温暖化で台風の移動速度が遅くなる, 報道発表, 2020 年 1 月 8 日
- ・「地球温暖化で台風の移動速度遅く 被害拡大のおそれ」, NHK ニュース, 2020 年 1 月 9 日
- ・「地球温暖化がそのまま進んだ場合, 日本付近を進む台風のスピードが, 今世紀の末には平均して現在よりもおよそ 10 パーセント遅くなることが予測される」, あさチャン, TBS, 2020 年 1 月 9 日
- ・「台風の速度、今世紀末に 10%遅く」, TBS 系 (JNN) ニュース, 2020 年 1 月 9 日
- ・「温暖化で速度が落ちる予測 台風被害が深刻化の恐れ」, テレビ朝日系 (ANN) ニュース, 2020 年 1 月 9 日
- ・「温暖化 台風の通過速度 10%遅く」, 朝日新聞, 2020 年 1 月 9 日
- ・「温暖化 台風ノロノロ 気象研など予測 今世紀末 10%減速」, 読売新聞, 2020 年 1 月 9 日
- ・「台風、温暖化で 1 割減速か 今世紀末に洪水増える恐れ 気象庁など研究」, 毎日新聞, 2020 年 1 月 8 日
- ・「台風の速度、10%遅く 温暖化厳しい対策しないと・・・今世紀末 被害拡大の恐れ」, 日本経済新聞, 2020 年 1 月 9 日
- ・「地球温暖化で台風の移動速度遅く 被害拡大のおそれ」, NHK NEWS WEB, 2020 年 1 月 9 日
- ・「温暖化で台風遅くなる 被害拡大の恐れ 気象研」, 時事通信社, 2020 年 1 月 8 日
- ・「地球温暖化によって台風の移動速度が遅くなる」, 共同プレスリリース, 2020 年 1 月 8 日
- ・「温暖化で台風移動遅く 今世紀末 気象研解析, 暴風雨長く深刻被害も」, 茨城新聞クロスアイ, 2020 年 1 月 9 日
- ・温暖化のはてな?② 遅くなる台風移動速度, 東京新聞, 2020 年 6 月 24 日
- ・過去 40 年で太平洋側に接近する台風が増えている, 報道発表, 2020 年 8 月 25 日
- ・「首都接近の台風 1.5 倍に…過去 40 年分析、太平洋高気圧の張り出し影響」, 読売新聞, 2020 年 8 月 26 日
- ・「東京へ台風接近、40 年で 5 割増 太平洋高気圧が原因か」, 朝日新聞, 2020 年 8 月 26 日
- ・「台風接近、過去 40 年で増加 東・西日本太平洋側に一気象研」, 時事通信, 2020 年 8 月 26 日
- ・「太平洋側に接近の台風増加 東京は 1.5 倍 温暖化影響も」, 日本経済新聞, 2020 年 9 月 11 日

- ・「過去 40 年で太平洋側に接近する台風が増えている」について、FM ゆうがお（電話収録），令和 2 年 10 月 2 日

- ・「太平洋側接近の台風増加」，東京新聞，2020 年 10 月 22 日

(副課題 3)

- ・「今夏は長梅雨か 激しい雨増加 (コメント)」，読売新聞，2019 年 6 月 16 日

- ・「温暖化進み雨量 6%増」 西日本豪雨，気象研解析，共同通信，2019 年 6 月 29 日

- ・NHK スペシャル「誰があなたの命を守るのか “温暖化型豪雨” の衝撃」 データ解析手法のコメント，NHK，2019 年 6 月 30 日

- ・「相次ぐ豪雨崩れた常識「長時間」「広域」温暖化の影響も」に「猛烈な雨の頻度 1.6 倍」が引用，朝日新聞朝刊 7 面，2019 年 7 月 8 日

- ・「温暖化 西日本豪雨に影響」，日本経済新聞朝刊，2019 年 7 月 12 日

- ・「地球温暖化と日本の豪雨」，ラジオ関西（電話収録），2019 年 7 月 22 日

- ・「記録的猛暑～確かになる温暖化の影響」，NHK 時事総論，2019 年 8 月 20 日

- ・Hiroaki Kawase, Japan's Ski Areas Are Having Their Worst Winter in Decades, Bloomberg news, 2020 年 1 月 20 日

- ・「関東の降雪の特徴と地球温暖化の日本雪への影響」，FM 群馬（電話収録），2020 年 1 月 22 日

- ・「ニュースザウルス福井」出演，NHK 福井，2020 年 3 月 14 日

- ・「LOVE OUR PLANET」電話収録，ZIP-FM，2020 年 5 月 29 日

- ・「温暖化で降水量増加」，毎日新聞，2020 年 7 月 8 日

- ・「豪雨日常化、牙むく梅雨 温暖化で降水量上積み」，日本経済新聞，2020 年 7 月 10 日

- ・「なぜ？「数十年に一度」の大雨、7 年で 16 回 特別警報多発の理由」，西日本新聞，2020 年 7 月 13 日

- ・「もし温暖化がなかったら」，朝日新聞，2020 年 9 月 20 日

- ・「気候危機 人類にブーメラン」，朝日新聞朝刊，2020 年 11 月 15 日

- ・「昨年の大雷雨 温暖化背景か」，2020 年 12 月 28 日

- ・「年々減る雪 降ればドカ雪」，朝日新聞，2021 年 1 月 4 日

- ・「一昨年台風 19 号 温暖化で雨量 1 割増」，日本経済新聞，2021 年 2 月 8 日

その他

(講演、アウトリーチ等)

- ・村田昭彦，適応施策に活用可能な気候予測データセットに関する話題提供，環境研究機関連絡会 研究交流セミナー，2020 年 12 月，オンライン

- ・野坂真也，適応策策定に資する日本域の温暖化予測，環境研究機関連絡会 研究交流セミナー，2020 年 12 月，オンライン

- ・川瀬宏明，いろんな人とつながった地球温暖化の研究，第 31 回日本気象学会夏季特別セミナー，2019 年 8 月，土浦市

- ・川瀬宏明，異常気象と地球温暖化の関係を解き明かす新手法～イベント・アトリビューション～，三重県気候講演会『地球温暖化によって 猛暑・豪雨・台風はどうなるのか』，2019 年 11 月，津

- ・川瀬宏明，近年の豪雨と地球温暖化～最新のイベント・アトリビューション～，日本気象学会関西支部例会，2020 年 12 月，岡山（オンライン）

- ・川瀬宏明，温暖化でどうなる 富山の雪・立山の雪，立山カルデラ砂防博物館，2021 年 3 月，富山（オンライン）

- ・山口宗彦，台風予報改善のための研究の最前線～社会の多様なニーズに応える～，気象研究所成果発表会，2019 年 12 月，東京

- ・山口宗彦，気象データの利用におけるリスクマネジメント ～さまざまなアンサンブル予報の形態～，令和 2 年度第 1 回 WXBC セミナー，2020 年 8 月，オンライン

- ・山口宗彦，地球温暖化が台風に及ぼす影響 ～これまでとこれから～，統合的気候モデル高度化研究プログラムオンライン講演会，2020 年 10 月，オンライン

- ・山口宗彦，映像で見る気象観測の世界，サイエンス Q 講義，2021 年 2 月，つくば市（桜中学校）

(受賞等)

- ・日本雪氷学会 2019 年度平田賞：川瀬宏明，日本及び周辺域における降雪・積雪環境の高精度将来

変化に関する研究

- 2019年気象庁長官表彰：台風予報・解析技術高度化プロジェクトチーム，台風強度予報の精度向上と期間延長に資する技術開発等による5日先までの強度予報の業務化への貢献
- 2020年度日本気象学会正野賞：川瀬宏明，領域気候モデルを用いた日本の地域気候変化予測に関する研究
- 日本気象学会気象集誌2020年論文賞：Kawabata, Y., and M. Yamaguchi, 2020: Probability ellipse for tropical cyclone track forecasts with multiple ensembles. J. Meteor. Soc. Japan, 98, 821-833.

2. 4. 研究終了報告

本節には、気象研究所が令和2年度に終了時評価を実施した経常研究、地方共同研究について、課題毎に研究成果等を掲載した。

2.4.1. 経常研究

- ・N 南海トラフ沿いのプレート間固着状態監視と
津波地震の発生状況即時把握に関する研究・・・・・・・・・・・・・・・・ 179

2.4.2. 地方共同研究

- ・機械学習を用いた地震波検測に関する研究・・・・・・・・・・・・・・・・ 197

N 南海トラフ沿いのプレート間固着状態監視と津波地震の発生状況即時把握に関する研究

研究期間：平成28年度～令和2年度

研究代表者：干場充之（地震津波研究部研究部長）

課題構成及び研究担当者

（副課題1）南海トラフ沿いのプレート間固着状態監視技術の高度化

（副課題2）津波地震などに対応した即時的地震像把握手法の開発

勝間田明男、小林昭夫、田中昌之、安藤忍、弘瀬冬樹、溜淵功史（以上、平成28～令和2年度）、中田健嗣（平成28～令和元年度）、藤田健一（平成28～30年度）、宮岡一樹（平成28～29年度）、前田憲二（平成28年度）、西宮隆仁（平成29～令和2年度）、橋本徹夫（平成29～令和元年度）、露木貴裕（平成30～令和2年度）、永田広平（令和元～2年度）、野田朱美（令和2年度）

（以下、併任）吉田康宏（平成28～令和2年度）、上野寛（平成28～30年度）、森脇健、田中美穂（以上、平成28～29年度）、露木貴裕、森田裕貴（以上、平成28年度）、甲斐玲子、前田憲二（以上、平成29～令和2年度）、木村久夫（平成29～30年度）、案浦理（平成29年度）、宮岡一樹、岩切一宏（以上、平成30～令和2年度）、山内崇彦（令和元～2年度）、中田健嗣（令和2年度）

研究の背景・意義

（社会的背景・意義）

平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の発生を受け、広範囲で大規模な被害が懸念され、かつ切迫性が高い南海トラフの大規模地震についての評価及び地震対策の見直しが各機関において行われている。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%）。平成26年6月24日には「経済財政運営と改革の基本方針2014（骨太方針）」が閣議決定され、その中で平成26年3月に内閣府によりまとめられた「南海トラフ地震防災対策推進基本計画」を推進することとしている。この基本計画の中では、「津波に関する情報については、（中略）予測の精度向上について検討を進める」こと、東海・東南海・南海地域の「時間差発生等への対応」の必要性が指摘されている。また、「経済財政運営と改革の基本方針2015（骨太方針）（平成27年6月30日閣議決定）」には、南海トラフ巨大地震などの自然災害に対し、研究・人材育成を含め防災・減災の取組を推進するとしている。国土交通省では、平成26年に「国土交通省南海トラフ巨大地震対策計画〔第1版〕」を公表し、重点項目の一つとして緊急地震速報・津波警報等及び津波観測情報の迅速化・高精度化を挙げている。また、内閣府は平成25年に「南海トラフ沿いの大規模地震の予測可能性について」の報告書を公表した。その中で、「地震の規模や発生時期を高い確度で予測することは困難である」が、「観測データの変化に基づいてプレート境界のすべり等の固着状態の変化が検知できれば、不確実性は伴うものの地震発生の危険性が相対的に高まっていることは言及できそうである」としている。地震調査研究推進本部は、平成24年9月に「新たな地震調査研究の推進について」、平成26年8月に「地震に関する総合的な調査観測計画～東日本大震災を踏まえて～」を発表した。これらの中で、「海溝型地震を対象とした地震発生予測の高精度化に関する調査観測の強化（プレート境界の状況を把握することが重要、調査観測から得られる成果を総合的に取り込んだモデルを構築することが重要）」を挙げている。平成25年に科学技術・学術審議会は「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について」を文部科学大臣や国土交通大臣などに建議し、その中で「モニタリングによる地震活動予測」や「地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化」のための研究について推進することを提言している。平成29年9月の中央防災会議防災対策実行会議において、「南海トラフ沿いの地震観測・評価に基づく防災対応検討ワーキンググループ」の検討結果が報告された。その報告では、現在の科学的知見からは2～3日以内に発生するとの確度の高い地震の予測は困難であること、東海地震のみならず南海トラフ全体で大規模地震が切迫していることを指摘している。また、典型的なケースとして、(1)南海トラフの東側だけで大規模地震が発生、(2)M7クラスの地震が発生、(3)先行現象を多種目観測、(4)プレート境界面でのすべりが発生をあげて検討した。これを受け気象庁では、平成29年11月から「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」を開催し、令和元年5月からは「南海トラフ地震臨時情報」の発表を開始した。

(学術的背景・意義)

十数年前から高密度のGPSや高感度地震計の展開により、南海トラフ沿いでは深部低周波微動・地震(高感度地震計で観測できる微小な振動)を伴うプレート境界の短期的スロースリップ(ゆっくりすべり)、長期的スロースリップ等が観測されるようになってきた。これらはプレート間巨大地震の震源域となりうる固着域周辺で発生している現象であり、プレート間の固着状態に影響を及ぼす可能性が指摘されている。このため、東海地域だけではなく南海トラフ全体におけるプレート間固着状態の変化を地震活動、地殻変動の複数の観測手法を用いて検出し、地震サイクルの数値シミュレーションによってそれら変化が示す意味に対する理解を深めることが重要である。また、想定東海地震が現時点で発生していないことから、南海トラフ全体で大規模地震が発生する可能性について指摘されている。東海地域で巨大地震が発生した場合、想定東海地震なのか、東南海・南海地域も連動して地震が発生したのか、あるいは今後連動して地震が発生するか等を評価することは国の応急対策活動や復旧・復興活動にとって極めて重要である。このため、南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会、地震防災対策強化地域判定会や地震調査委員会等で、発生した巨大地震や今後の巨大地震の連動可能性についてすみやかに検討できるよう、震源域がどこまで及んでいるか等を速やかに分析して提供できるようにする必要がある。さらに、過去の南海トラフ沿いの地震のうち1605年の慶長地震は、地震動被害に比べて津波被害が大きい「津波地震」であった可能性が指摘されている。平成23年の東北地方太平洋沖地震の発生は、改めて地震の多様性を示す例となっており、津波地震に対しても対策が必要である。現在の気象庁の津波警報システムでは、巨大地震の発生時に規模を過小評価しない対策は取られているが、さらに適切な津波警報等を行うために津波地震の識別の信頼性向上と津波地震の定量的な規模推定を行う必要がある。

(気象業務での意義)

南海トラフ沿いにおける地震に関する観測体制の整備が法律(東南海・南海地震に係る地震防災対策の推進に関する特別措置法(平成14年7月26日法律第92号))で求められており気象庁でも観測強化を進めている。平成29年11月からは気象庁による「南海トラフ地震に関連する情報」の発表が開始された。本研究課題は、南海トラフ沿いの震源域およびその深部延長域におけるプレート境界の固着状態の監視能力の向上を通じた地震直前の異常検知の早期化への寄与と、地震発生シミュレーションなどによる地震発生に至る過程の解明を通じた南海トラフ沿いの海溝型巨大地震の観測・監視業務への貢献を目的としている。

現在の気象庁の津波警報システムでは、巨大地震の発生時に規模を過小評価しない対策は取られているが、本研究課題の津波地震の識別の信頼性向上と津波地震の定量的な規模推定により期待される成果は、さらに適切な津波警報等に寄与する。

また、東海地域で地震が発生した場合、判定会では発生した地震が東海地震であるかどうかの判定を行う必要がある。評価検討会では今後連動して地震が発生するか等について評価を行う必要がある。本研究課題の地震の規模・震源域の広がり等を即時に推定する手法はこの判定に寄与する。

研究の目的

(全体)

切迫性の高い南海トラフの大規模地震に関連し、プレート境界におけるスロースリップ、プレスリップなど固着状態の変化を検出するための手法を高度化するとともに、観測された現象と大地震発生との関連性を理解し、地震発生前の的確な情報発信を可能とする。さらに、津波地震を含む巨大地震の多様な発生状況を想定した地震の規模・震源域の広がり等を迅速に把握するための手法を開発し、津波地震に対する津波警報の適切な発表や、東海・東南海・南海地域の時間差発生対応のための割れ残りの判定により、的確な災害対策に貢献する情報発信を可能とする。これらにより大地震、津波から国民の生命と財産を守る。

(副課題1)

南海トラフの大規模地震に関連した、プレート間固着状態変化検出の手法向上と、観測現象の理解向上による地震発生前の的確な情報発信。

(副課題2)

津波地震を含む大規模な地震発生の的確な把握による、地震発生後のよりの的確な防災情報発信。

研究の目標

(全体)

南海トラフ沿いのプレート境界におけるスロースリップ、プレスリップなど固着状態の変化を検出するための手法を高度化するとともに、その物理的背景（固着域の状態変化）に関する説明能力の向上を図る。さらに、津波地震を含む巨大地震の多様な発生状況を想定した地震の規模・震源域の広がり等を迅速に把握するための手法を開発する。

(副課題 1)

1.1 プレート間固着状態のモニタ

1.1.1 衛星データ（干渉 SAR）による地殻変動検出手法の改良

プレート間の固着状態の変化による地殻変動を面的に詳細に把握するため、人工衛星リモートセンシング手法の一つである SAR 干渉解析手法の改良を行う。

1.1.2 スロースリップ変動源推定手法の高度化

プレート間のゆっくりしたすべり現象について、数か月から数年間継続する長期的スロースリップによる地殻変動をひずみ計、GNSS 等を用いて客観的に検出するなど、すべり現象の検出手法、変動源を推定する手法の改良を行う。

1.2 地震発生の数値シミュレーションによる固着状態推定

観測された固着状態の変化の物理的背景の理解を進めるとともに、プレスリップにつながるなど将来の大地震の発生に結びつく可能性について評価する手法を開発する。

(副課題 2)

2.1 津波地震等の検出手法の開発

津波地震や海底地すべりの発生を検知し、津波予測に用いるための規模等を推定するための手法を開発する。

2.2 余震活動の即時把握の高度化

発生した地震の震源域の広がり把握や、余震発生予測等に寄与するため、地震発生直後の余震の発生状況について即時に把握する手法を改良する。

2.3 地震断層のすべり分布推定手法の高度化

津波予測や連動発生地震の監視に寄与するため、発生した地震のすべり分布を迅速に推定するための手法を改良する。

研究結果

(1) 成果の概要

(全体)

副課題 1 のプレート間固着状態監視として、GNSS やひずみ、傾斜データを用いたスロースリップの検出と変動源の推定精度向上、干渉 SAR を用いた定常地殻変動の検出、地震波形を用いた浅部低周波微動の特徴把握などを行った。また、地震発生シミュレーションにおいて、最新の観測・解析結果を取り込み、南海トラフ沿い巨大地震の過去の発生パターンを再現するモデルを構築した。副課題 2 の津波地震関係については、津波地震（破壊伝播速度が遅く、地震動のわりに津波が大きな地震）の規模推定手法開発、海底地すべりや山体崩壊に関する事例調査を行った。余震活動把握のための自動震源決定については、本手法の運用開始後に明らかになった地震頻発時の震源決定精度低下やエアガンが誤って震源決定されるなどの問題点について適切な改良を行った。断層すべり分布推定については、遠地地震波を用いた自動解析手法を開発し、地震発生後 45 分程度ですべり分布が得られるようにした。

(副課題 1)

(1.1) プレート間固着状態のモニタ

- ・中国地方を領域固定した GNSS 日値を用い、フィリピン海プレートの沈み込みと逆方向の成分について、南海トラフのプレート等深線 25 km および 30 km 沿いに計算地点を並べ、それら地点を中心とする一定範囲内の観測点の平均を求め、1 年および 1 週間の傾斜期間を持つランプ関数との相関を取ることで、南海トラフ沿いの長期的（1 年から数年程度の継続期間）および短期的（数日から 1 週間程度の継続時間）スロースリップの客観的な時空間分布を得る手法を開発した。これにより、2000～2002 年に紀伊水道長期的スロースリップが発生していたことを新たに指摘し、そのすべり分布を推定した。
- ・中国地方を領域固定した GNSS 日値を用い、フィリピン海プレートの沈み込みと逆方向の成分

について2年間の変化量を求め、あらかじめ南海トラフのプレート等深線 25 km 上を中心とする矩形断層に一定のすべりを与えて計算した理論変位と比較することで、南海トラフ沿いの長期的スロースリップの2年あたりの規模の時空間分布を得る手法を開発した。

- ・GNSS 日値を用い、2017年春から2018年秋にかけて発生した志摩半島付近の長期的スロースリップを検出した。長期的スロースリップ発生期間には隣接する領域で短期的スロースリップが活性化され、短期的スロースリップによる変位を除くと長期的スロースリップのすべりの規模は Mw 6.4 相当であった。

- ・GNSS 日値の解析から、2014年半ばから始まった紀伊水道における長期的スロースリップが2017年まで継続し、その規模が2017年1月時点で Mw 6.7 相当であることを明らかにした。

- ・ひずみデータのスタッキング解析により、2013年に開始した東海地域長期的スロースリップのモーメント解放量の時間変化を求めた。このとき、ひずみ計設置後の緩和的なトレンド変化を補正した解析を行い、GNSS を用いた解析結果と合う結果が得られた。

- ・やや長期間のひずみデータを用いたスタッキングにより、東海地域の短期的スロースリップの時空間分布を明らかにした。

- ・ひずみデータを用い、グリッドサーチと SCE-UA 法を組み合わせ、南海トラフ沿いの短期的スロースリップの矩形断層を推定する手法を開発した。

- ・レーザー式変位計及びひずみデータから、これまで報告されていない継続時間約1時間のスロースリップ現象を発見した。そのスロースリップは愛知県中部の短期的スロースリップが発生している期間中に同地域で発生したもので、Mw 5.0 ほどの規模を持ち Ide et al. (2007) のスロー地震のスケーリング則と調和的であった。

- ・気象庁に導入済みのすべり位置推定ツールに、ひずみ、傾斜、GNSS それぞれ単一のデータを用いてすべり分布インバージョン解析を行えるよう機能を追加した。また、複数のデータ項目を同時に用いたすべり分布インバージョン機能を開発した。

- ・防災科研の傾斜データを潮汐・気圧補正し、ひずみデータに傾斜データを追加した場合に、スタッキングによる短期的スロースリップの検知能力が改善されることがわかった。

- ・海底観測システムである DONET の2015年9月から2016年4月までの連続地震記録をエンベロープ相関法により解析し、南海トラフの島弧側において浅部低周波微動が発生していることがわかった。微動は2015年10月と2016年4月に発生しており、深部の微動活動と同様に地震動によるトリガ現象が見られた。

- ・南海トラフ沿いの浅部低周波地震の処理にエンベロープ相関法を適用し、2018年3月から6月にかけて断続的に四国地方南東沖から紀伊半島南方沖で浅部低周波微動活動が活発なことを示した。

- ・2014年7月～2014年12月までの連続地震波形を用いて、西南日本の南海トラフ沿いの深部低周波地震活動に Matched Filter (MF) 法を適用してイベントの検出を行った。その結果、5188個のイベントを検出し、3744個の震源を決定した。イベント検出の際の誤検出率は約4.0%と低い値であるにも関わらず、MF 法で決定した震源数は一元化震源カタログに掲載されている同期間、同領域の深部低周波地震数の約2倍となった。

- ・SAR 衛星 ALOS のデータを用いた時系列解析により、御前崎、潮岬、室戸岬、足摺岬周辺の定常的な地殻変動の検出を行い、面的に詳細でスムーズな地殻変動分布を得た。2.5次元解析の結果とGNSS観測点の変位を比較し、特に上下方向で0.5 cm/年の範囲内で調和的であることを確認した。

- ・年平均潮位に日本沿岸の海水位の長期変化傾向を補正して、長期間の地殻上下変動を推定した。各地点の最近の上下変動速度はGNSSとほぼ一致し、串本では1925～1942年に年平均3 mm 強の沈降速度が推定された。

- ・2004年紀伊半島南東沖の地震後に行った海底地震計観測から、浅部低周波地震が紀伊半島南東沖の地震の余震域と近接した場所で多数発生していたことを示した。また、浅部低周波地震が2004年新潟県中越地震や潮汐に敏感に反応していること、浅部低周波地震と浅部超低周波地震が同じすべり現象であることを示した。

- ・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、これら観測データに浅部低周波微動が含まれていないか調査するツールを開発した。過去データへ適用を開始したが、微動活動とみられるイベントは見つかっていない。

(1.2) 地震発生シミュレーションによる固着状態推定

- ・南海トラフ沿いの巨大地震シミュレーションにおいて、巨大地震の発生履歴、比較的良好にわかっている昭和東南海・南海地震のすべり分布、最新のすべり欠損レート分布、そして繰り返す長期的スロースリップに対応したパラメータを設定し、それらを再現するモデルを構築した。宝永→安政→昭和の発生順は再現できなかったが、各地震のすべり分布は概ね再現できた。
- ・2016年4月に紀伊半島南東沖で発生したようなM6クラスの地震が南海トラフ巨大地震に与える影響について数値モデルを用いて調査した。低角・M6.5の地震を仮定した場合、サイクル終盤に擾乱を投入すると擾乱の半年～1年以内に巨大地震を誘発し、規模は若干小さくなった。その他の場合は、巨大地震にはほとんど影響を与えない。
- ・南海トラフ沿いシミュレーションにおいて、東海と豊後水道の傾斜方向浅部が未破壊の状態であれば長期的スロースリップが出現する傾向を示した。浅部の未破壊域によって生じる応力不均一が、その深部に位置する長期的スロースリップの発生要因となっていると考えられる。1944年東南海地震や1946年南海地震で両長期的スロースリップ域の傾斜方向浅部が未破壊と考えられていることと、長期的スロースリップが現在観測されていることとは整合する。
- ・日本海溝沿い（青森県東方沖から房総沖）について、深さ16-50kmの地震発生層にM7-8を想定した小さなL（特徴的すべり量）と σ （有効法線応力）を持つアスペリティ9個、海溝軸の浅部にM8-9及び津波地震を想定した大きなLと σ を持つアスペリティ3個を設定し、2011年東北地方太平洋沖地震時のすべり分布や余効すべり分布、M9前に観測されたスロースリップ、M7-9の発生間隔を概ね再現する地震発生シミュレーションモデルを構築した。
- ・千島海溝沿い（十勝沖からウルフ島沖）シミュレーションについて、深さ20-40kmの地震発生層に小さなL（特徴的すべり量）を持つアスペリティ5個、十勝・根室沖の浅部に大きな σ （有効法線応力）とLを持つアスペリティ1個を設定し、M7-9地震の規模や発生間隔をある程度再現した。ただし、発生パターン（順番）の再現には至っていない。
- ・飯作家文書中の「大地震富士山焼之事覚書」の原本を確認し、全文を翻刻した。この史料の観測地は『新収日本地震史料』に記された静岡市ではなく、富士本宮浅間社のあった富士宮市と考えられる。この史料は富士本宮浅間社および富士宮市の宝永地震被害、富士宮市から見た宝永噴火、地震被害からの復興に関する史料として、現存知られているものの中では最も完全なもの、かつ、古い時代に記されたものと考えられる。

（副課題2）

（2.1）津波地震等の検出手法の開発

- ・津波地震の規模推定法として、積分変位を用いた方法、複数の帯域の変位振幅を用いて特徴的周期を抽出する手法などを開発した。複数帯域振幅を用いた手法を、過去に世界の各地で発生した津波地震を模擬した地震記録及び日本周辺で発生した規模の大きな地震の記録に適用した結果、一部の過大評価はあるもの、適正に規模が推定できることが確認された。
- ・遠地実体波のスペクトル解析から、代表的な津波地震（Mw7クラス後半）の特徴抽出を行った。震源スペクトルを推定し通常海溝型地震のものと比較したところ、気象庁マグニチュードに特徴的な周波数帯でみるとマグニチュード換算で1程度小さく震度階級で2階級低くなる結果が得られた。そこで、スペクトル解析結果及び先行研究に基づき、津波地震の震源時間関数を設定し、日本各地の地震観測点での理論波形を算出して時間領域から気象庁マグニチュードを評価した。その結果、気象庁マグニチュードが津波地震の規模を1以上過小に評価する可能性があることが確認された。
- ・1998年パプアニューギニアの地震発生10分後の海底地すべりにより津波が発生したとみられる事例について、地すべりによる地震波の励起の理論計算を行い、地震発生後間もない地震計記録からでは地すべり現象が検知困難であることを明らかにした。
- ・2018年インドネシアのスラウェシ島パル湾で発生した津波について、観測された遡上高・ビデオ記録に基づいて地震断層モデルによる津波モデルを再検討し、地震断層モデルだけでは、津波記録を再現することが困難であることを示した。更に、それらの遡上高・ビデオ記録を説明する海底地すべりによる津波のモデルを提示した。
- ・山体崩壊による津波について、崩壊後の地形を与えた上で崩落させた土砂の移動を計算し、その結果に基づいて津波を計算する手法について検討を行った。この手法を歴史津波観測高の得られている1741年渡島大島及び1792年雲仙眉山の事例に適用し、概ね妥当な予測結果を得た。更に、同手法を過去に山体崩壊を起こしたことのある富士山に適用し、南方に崩壊した場合には駿

河湾に土砂が流入して津波を発生する可能性のあることを示した。

- ・単独観測で得られる地震動データから、津波来襲の可能性の検知が可能であるかどうか調査した。加速度記録を積分して得られる20秒周期の変位を用いた。比較的最近発生したM8クラス以上の地震のデータを用いて、観測点から約100kmまで震源域が至るM8クラスの地震の発生が識別可能であることを示した。ただし、東北日本太平洋沖地震の場合には、日本海側の観測点においても津波の危険性を示すような誤検知も示した。

(2.2) 余震活動の即時把握の高度化

- ・2016年4月に運用開始した自動震源決定手法(PF法)の改良を行い、震源出力条件の見直し、複数の地震が発生した場合には振幅の大きいイベントから処理を行うこと、及び走時残差が大きな相を削除する等の改良を行った。その結果、島嶼部及び地震多発時における震源決定性能を向上させた。さらに、ベイズ推定における事前確率を改良することにより、計算結果に変化を与えずに解の収束速度をわずかではあるが向上した。
- ・波形相関を用いた自動震源の識別手法を開発し、2016年熊本地震の自動処理結果(35,921個)に適用した。その結果、58%に相当する20,970個の地震が目視確認した震源と同等の精度であり、目視に寄らず精度の高い震源を抽出できた。
- ・自動震源決定手法に関連し、海底地震計で特徴的に観測される人工ノイズであるエアガンの信号を、波形の自己相関を用いて効率的に識別する手法を開発した。
- ・2016年4月から2017年12月までの気象庁に導入されたPF法自動震源の処理結果を評価し、その導入前後で一元化震源カタログのイベント数が2倍となり、導入によって震源カタログに系統的な差が生じていないことを確認した。
- ・2011年3月の地震波形に震源自動決定手法(PF法)を適用し、現在の一元化震源カタログの2倍以上のイベントを検出した。その結果、東北地方では規模別頻度分布のべき乗則(GR則)が成り立つMの下限を約1.0程度低下できることを示した。

(2.3) 地震断層のすべり分布推定手法の高度化

- ・解析に時間を要していた遠地実体波震源過程解析の迅速化のため、サンプリング間隔・基底関数の数等を最適化し、比較的短い処理時間で安定して解が得られる自動解析プログラムを開発した。その結果、地震発生後約45分後に、震源過程解析結果が得られるようになった。
- ・2011年(M6.1)と2016年(M6.3)に茨城県北部において発生した2地震の震源過程を推定した。余震分布からは、これらの2地震は全く同じ断層面の活動として解析されたが、震源過程解析からは、2地震は共通の断層面の活動ではあったが、すべりが大きかった領域は重なりあってはいないとみられる。
- ・2016年4月14日と4月16日の熊本地震の震源過程解析、干渉SAR解析を行い、震源過程解析で推定されたすべり分布をもとにした地殻変動が干渉SAR解析結果と整合することを確認した。
- ・国内外で発生した規模の大きな地震に伴う地殻変動について干渉SAR解析を行った。このうち、イタリア中部で発生した地震とフィリピンレイテ島で発生した地震については、震源過程解析から得られたすべり分布との比較を行い、矩形断層モデルの推定を行った。

(2) 当初計画からの変更点(研究手法の変更点等)

干渉SARの大気遅延軽減手法については、文部科学省の次世代火山研究推進事業の課題B: 先進的な観測技術の開発のサブテーマ2の中で開発された、気象庁が公表している数値気象モデルの解析値を用いた大気遅延軽減手法を利用することとし、この手法を加味した時系列解析を中心に研究を進めた。なお、気象庁数値モデルの変更による軽減手法の妥当性については、火山研究部が実施している火山活動の監視・予測手法に関する研究の副課題1地殻変動等に基づく火山活動評価の中で、引き続き手法の改善を検討している。

経常研究S「地震と津波の監視・予測に関する研究」の事前評価の結果、北海道・千島列島南部沖の地震発生シミュレーションを本課題において実施することとした。

(3) 成果の他の研究への波及状況

本課題の自動震源決定手法により得られた即時・多数の震源データを用いて、重点研究B2「地震活動・地殻変動監視の高度化に関する研究」(H26-30)、経常研究S「地震と津波の監視・予測に関する

研究」(R1-5)の地震活動評価に関する解析が行われた。また、本課題の干渉 SAR 時系列解析手法は、重点研究 B5「地殻変動観測による火山活動評価・予測の高度化に関する研究」(H26-30)、経常研究 V「火山活動の監視・予測に関する研究」(R1-5)において活用された。

(4) 事前・中間評価の結果の研究への反映状況

事前評価での指摘と対応は以下の通り。

- ・現在実施中の他の研究課題 (B2「地震活動・地殻変動監視の高度化に関する研究」(H26-30) 及び B3「津波の予測手法の高度化に関する研究」(H26-30)) と連携し、得られた成果を積極的に活用しながら進められる体制とする必要がある：

B2 課題において開発された地殻変動検出手法を本課題で取り入れて、副課題 1 に関わる解析を行った。本課題の自動震源決定手法により得られた即時・多数の震源データを用いて、B2 課題の地震活動評価に関するツールが開発された。また、B3 課題において検討が進められてきた津波計算法は副課題 2 の津波計算に用いた。

- ・容易ではないが、1945 年三河地震など誘発地震や余震の予測にも取り組んでほしい：

誘発地震の予測自体は未だに困難であるが、地震発生シミュレーション手法を用いて、規模の大きな地震相互の影響評価を行えるようにし、2016 年 4 月に三重県南東沖において発生した地震 (M 6.5) に適用し、南海トラフ沿いの巨大地震との関連性の評価を行った。

- ・1605 年慶長地震は、南海トラフの地震ではないという説 (石橋 (2014)) がある。こういった考えに対して、説明できる知見を本研究で得られることを期待する：

これまでのところ慶長地震に関する新たな知見は得られていないが、南海トラフの地震に関し歴史史料を用いた研究も行った。また、近年日本近海で発生していない津波地震については、世界各地で発生した津波地震の地震データを解析し、日本近海で発生した場合の津波予測上の問題点の検討を進めた。

中間評価での指摘と対応は以下の通り。

- ・副課題 2 の即時的地震像把握手法の開発は、B1 (緊急地震速報) や B3 (津波) 課題の後継課題と併合した方がいいのでは：

本課題の地震像即時把握部分を計画途中で切り離すことはできないが、緊急地震速報、津波の分野とは連携して計画を進めた。B1 や B3 の後継課題である S 課題「地震と津波の監視・予測に関する研究」(R1-5) において、緊急地震速報は揺れから揺れを予測する手法の高度化、津波は沖合の観測値からの波源推定や沿岸域での後続波の予測精度向上が中心であるが、本課題の後継課題でも両分野と連携して研究を進める予定である。

- ・中央防災会議の典型ケースを意識しつつ研究を進めるのが望ましい。ただ 5 年や 10 年の研究で結論が出るものではない事も留意する必要がある：

地震像の即時把握は大地震発生時の 2 ケースを、プレート間固着状態監視はスロースリップケースを意識した研究を行った。また、本課題の後継課題でも、引き続き南海トラフ地震臨時情報に結び付く 3 ケースに関連した研究を予定している。

- ・物理的背景 (プレート間固着域の状態変化) に関する説明能力の向上を図るための研究にも今後は力を入れて欲しい。他の研究課題の研究成果を適用しつつ、南海トラフの地震発生ポテンシャルの定量的把握に引き続き努めて欲しい：

スロースリップや低周波地震が将来の大地震発生とどのような物理的意味を持ち、どんな現象が発生したら大地震の危険性が高まるのかについては、気象庁からも要望の強い課題である。しかし、本課題では長期的スロースリップは再現でき、一部物理的背景の考察をしたが、短期的スロースリップなど小規模な現象の再現はできていない。本課題の後継課題では、メッシュ細分化、高速化により、短期的スロースリップなど小規模な現象の再現をし、まずは現状把握されているプレート間固着状態変化の物理的背景の説明を試みたい。

(5) 今後の課題

本課題で取り組んだプレート間固着状況変化の把握や地震像 (規模やすべり分布) の即時把握に関する研究は一定の進展が見られ、開発された複数の手法が気象庁の業務に取り入れられ、または業務化が検討されている。気象庁では 2019 年 5 月から南海トラフ地震臨時情報等の提供を開始したが、臨時情報に結び付く大地震発生とスロースリップケースについては、本課題で取り組んだ内容でもある。

本課題により、津波地震の規模推定や地震の破壊領域の早期把握が可能となったが、南海トラフ地震臨時情報発表のためには、発生した地震の地震像把握の更なる迅速化が必要となる。また、陸域（プレート境界深部）で発生するスロースリップについては解析手法が高度化されたが、海域（プレート境界浅部）のスロースリップについては不十分である。今後、臨時情報等の発表迅速化、発表につながるすべりの監視強化のため、主に海域を意識した地震像やスロースリップの推定精度と即時性の向上を図る研究を進める必要がある。また、地震発生シミュレーションは、長期的スロースリップの再現が可能になったが、現在観測されている短期的・小規模な現象の再現のため、メッシュ細分化、高速化を行う必要がある。

自己点検

（１）到達目標に対する達成度

スロースリップなど固着状態変化の解析手法の高度化、津波地震を含む地震像の迅速な把握手法の開発・高度化という目標は概ね達成した。

（２）到達目標の設定の妥当性

開発した複数の手法が気象庁業務に取り入れられ、または業務化が検討され、各種解析で活用されており、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

研究担当者間で定期的に打ち合わせ、研究手法について確認するなど、相互の研究がスムーズに進むようにした。また、併任を含む気象庁担当者とも適宜打ち合わせを行い、研究の進捗状況や最新の要望を共有した。以下の共同研究などを実施し、各研究機関とも連携して研究を進めた。

- ・東海大学「プレート境界の海底地震活動に関する共同研究」（副課題 1.1 駿河湾における海底地震観測関連）
- ・京都大学・東北大学「南海トラフ沈み込み帯におけるゆっくりすべりに関する共同研究」（副課題 1.1 スロースリップ関連）
- ・国土地理院「GNSS データと地震計データを用いた断層すべり推定に関する研究」（副課題 2.1 地震像即時把握関連）
- ・防災科学技術研究所「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」（副課題 1.1 スロースリップ関連）
- ・東京大学地震研究所共同研究「新世代合成開口レーダーを用いた地表変動研究」（副課題 1.1 干渉 SAR 関連）
- ・東京大学地震研究所共同研究「『みんなで翻刻』ソフトを用いた地震研究所所蔵地震史料の調査・研究」（副課題 1.2 古文書関連）
- ・宇宙航空研究開発機構共同研究「干渉 SAR 手法を用いたプレート間固着による定常的な地殻変動の検出」（副課題 1.1 干渉 SAR 関連）
- ・東京大学・沖縄気象台「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」（副課題 1.1 スロースリップ関連）
- ・大阪管区気象台（地方共同研究）「機械学習を用いた地震波形検測に関する研究」（副課題 2.2 自動震源決定関連）
- ・沖縄気象台（地方共同研究）「沖縄地方の低周波地震の震源決定と発生状況等の調査」（副課題 1.1 スロースリップ関連）
- ・科研費（若手研究）「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」（副課題 2.2 自動震源決定関連）

（４）成果の施策への活用・学術的意義

研究成果は、以下のように気象庁業務への活用、各種会議への報告がなされている。

（気象庁業務への活用）

- ・気象庁における南海トラフ沿い深部低周波地震の処理に、2018年3月22日から Matched Filter 法が導入された。
- ・気象庁に導入されているスロースリップ用のすべり位置推定ツールに、すべり分布インバージョン解析を行えるよう機能を追加した。
- ・気象庁に導入されているひずみスタッキング処理に、ひずみ設置後のトレンドを補正する処理を追加した。
- ・南海トラフ沿い GNSS を用いた長期的スロースリップ客観検知手法、規模推定手法が 2021年3月

から気象庁に導入された。

- ・自動震源決定手法が 2016 年 4 月 1 日から気象庁の地域地震情報センターデータ処理システム (REDC3) に導入された。また、改良版が 2017 年 3 月 22 日から運用開始された。
- ・波形相関による自動震源分類処理を気象庁に提供し、2016 年熊本地震の余震処理に活用された (2016 年 12 月)。
- ・遠地実体波震源過程解析の準自動解析プログラムを気象庁のシステム上に構築した (2016 年 8 月 25 日)。

(各種会議への報告)

- ・第 211 回地震予知連絡会 (2016 年 05 月 18 日) において、平成 28 年 (2016 年) 熊本地震に関する資料 (干渉 SAR、近地震源過程解析、余震解析) を提出した。
- ・南海トラフ沿いの浅部低周波地震の処理にエンベロープ相関法を適用した。処理結果は 2018 年 4 月以降の地震防災対策強化地域判定会資料に活用されている。
- ・第 363 回地震防災対策強化地域判定会 (2016 年 7 月 25 日) において、ひずみ計データのスタッキング解析から、2013 年から継続している長期的ゆっくりすべりが鈍化していることを報告した。
- ・第 7 回南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会 (2018 年 5 月 9 日)、第 16 回南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会 (2019 年 2 月 7 日) において、志摩半島付近の長期的スロースリップが 2017~2018 年にかけて発生していたことを報告した。
- ・GNSS 日値を用いた南海トラフ沿い長期的スロースリップ客観検知に関する資料を 2018 年 2 月から定期的に地震防災対策強化地域判定会、地震予知連絡会に提出している。
- ・第 360 回地震防災対策強化地域判定会 (2016 年 4 月 25 日) において、2016 年 4 月に紀伊半島南東沖で発生したような M6 クラスの地震が南海トラフ巨大地震に与える影響について報告した。
- ・第 211 回地震予知連絡会 (2016 年 05 月 18 日) において、2016 年 4 月 1 日の三重県南東沖の地震に関する資料 (地殻変動、数値シミュレーション) を提出した。
- ・第 15 回津波予測技術に関する勉強会 (2018 年 2 月 21 日) において、津波地震及び海底地すべりなどによる津波の予測技術に関する報告を行った。

(5) 総合評価

副課題 1 では各種データを用いたスロースリップ、低周波微動検出、変動源推定手法の高度化、南海トラフ巨大地震の発生パターンを再現する地震発生モデル構築などを行った。副課題 2 では、津波地震の規模推定手法開発、海底地すべりや山体崩壊に関する調査、自動震源決定、すべり分布推定手法の改良などを行った。開発した複数の手法が気象庁業務に取り入れられ、または業務化が検討され、各種解析に用いられている。目標を達成し、業務的にも重要な貢献をした。

研究成果リスト

(1) 査読論文 : 21 件

1. Katsumata, A., M. Tanaka, and T. Nishimiya, 2021: Rapid estimation of tsunami earthquake magnitudes at local distance. *Earth, Planets and Space*, **73:72**, 1-15.
2. Nakata, K., A. Katsumata, and A. Muhari, 2020: Submarine landslide source models consistent with multiple tsunami records of the 2018 Palu tsunami, Sulawesi, Indonesia. *Earth, Planets and Space*, **72**, 44.
3. Tamaribuchi, K., A. Kobayashi, T. Nishimiya, F. Hirose, and S. Annoura, 2019: Characteristics of Shallow Low Frequency Earthquake Off the Kii Peninsula in 2004 revealed by Ocean Bottom Seismometer. *Geophysical Research Letters*, **46**, 13737-13745.
4. Yamada, M., T. Kandel, K. Tamaribuchi, and A. Ghosh, 2019: 3D Fault Structure Inferred from a Refined Aftershock Catalog for the 2015 Gorkha Earthquake in Nepal. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **110**, 26-37.
5. Kobayashi, A. and T. Tsuyuki, 2019: Long-term slow slip event detected beneath the Shima Peninsula, central Japan, from GNSS data. *Earth, Planets and Space*, **71**, 60.
6. Nakata K., A. Kobayashi, A. Katsumata, F. Hirose, T. Nishimiya, K. Kimura, H. Tsushima, K. Maeda, H. Baba, N. Hanamura, C. Yamada, and M. Kanezashi, 2019:

- Double seismic zone and seismicity in the mantle wedge beneath the Ogasawara Islands identified by an ocean bottom seismometer observation. *Earth, Planets and Space*, **71**, 29.
7. Nakata, K., Y. Hayashi, H. Tsushima, K. Fujita, Y. Yoshida, and A. Katsumata, 2019: Performance of uniform and heterogeneous slip distributions for the modeling of the November 2016 off Fukushima earthquake and tsunami, Japan. *Earth, Planets and Space*, **71**, 30.
 8. Tamaribuchi, K., 2018: Evaluation of automatic hypocenter determination in the JMA unified catalog. *Earth, Planets and Space*, **70**, 141.
 9. Tamaribuchi, K., Y. Yagi, B. Enescu, and S. Hirano, 2018: Characteristics of foreshock activity inferred from the JMA earthquake catalog. *Earth, Planets and Space*, **70**, 90.
 10. Katsumata, A., Y. Hayashi, K. Miyaoka, H. Tsushima, T. Baba, P. A. Catalán, C. Zelaya, F. R. Vasquez, R. Sanchez-Olavarría, and S. Barrientos, 2017: Stand-alone tsunami alarm equipment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **17**, 685-692.
 11. Annoura, S., T. Hashimoto, N. Kamaya, and A. Katsumata, 2017: Shallow episodic tremor near the Nankai trough axis off southeast Mie prefecture, Japan. *Geophysical Research Letters*, **44**, 3564-3571.
 12. Kobayashi, A., 2017: Objective detection of long-term slow slip events along the Nankai Trough using GNSS data (1996-2016). *Earth, Planets and Space*, **69**, 171.
 13. 小林昭夫, 2021: GNSSによる長期的スロースリップ客観検出手法の応用 —短期的スロースリップの検出と長期的スロースリップの規模推定—. *気象研究所研究報告*, **69**, 1-14.
 14. 馬場久紀, 中尾風佐, 西宮隆仁, 篠原雅尚, 阿部信太郎, 鶴我佳代子, 2021: 海底地震計記録に捉えられた台風24号の通過に伴う駿河湾北部の混濁流. *地震*, **73**, 197-207.
 15. 溜瀧功史, 中川茂樹, 2020: 広域多発時における自動震源を用いた地震活動評価—平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震への適用—. *験震時報(論文)*, **83**, 3.
 16. 小林昭夫, 弘瀬冬樹, 堀川晴央, 平田賢治, 中西一郎, 2018: 1707年宝永地震と富士山宝永噴火に関する一史料——飯作家「大地震富士山焼之事覚書」の調査と翻刻——. *地震*, **70**, 221-231.
 17. 露木貴裕, 長谷川浩, 近澤心, 木村久夫, 棚田理絵, 沼野あかね, 2017: 新しい地震活動等総合監視システム(EPOS)における地殻変動監視手法の改善. *験震時報(論文)*, **81**, 5.
 18. 溜瀧功史, 2017: 波形相関による自動震源分類の効率化. *験震時報(論文)*, **81**, 6.
 19. 田中美穂, 岩切一宏, 2017: 2つの茨城県北部の地震(MJMA6.1, MJMA6.3)の震源過程と破壊域の比較. *験震時報(論文)*, **81**, 7.
 20. 森脇健, 2017: Matched Filter法を用いた西南日本の深部低周波地震の自動検出. *験震時報(論文)*, **81**, 3.
 21. 中田健嗣, 小林昭夫, 平田賢治, 対馬弘晃, 山崎明, 勝間田明男, 前田憲二, 馬場久紀, 一ノ瀬里美, 牛田堯, 石原昂典, 稲村嘉津也, 蓮澤豪, 2017: 自己浮上式海底地震計観測によって推定された紀伊半島南方の南海トラフ軸南側の地震活動. *地震*, **69**, 59-68.

(2) 査読論文以外の著作物(翻訳、著書、解説): 16件

1. 気象研究所, 2021: 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*, **105**, 373-377.
2. 気象研究所, 2021: 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*, **105**, 37-41.
3. 気象研究所, 2020: 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*, **104**, 366-368.

4. 宮岡一樹, 小林昭夫, 2020: 南海トラフ地域のスロー地震 (2) 気象庁・気象研究所による観測. *地震予知連絡会 50 年のあゆみ*, 148-150.
5. 気象研究所, 2020: 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*, **103**, 251-252.
6. 干場充之, 2019: シンポジウム「南海トラフ地震臨時情報: 科学的データや知見の活用」開催報告. *日本地震学会ニュースレター*, **72**, NL-4-31-33.
7. 気象研究所, 2019: 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*, **102**, 277-279.
8. 気象研究所, 2019: 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*, **101**, 379-382.
9. 気象研究所, 2018: 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*, **100**, 280-283.
10. 安藤忍, 2018: 陸域観測技術衛星「だいち2号」(ALOS-2/PALSAR-2)を用いた合成開口レーダ(SAR)干渉解析. *平成28年(2016年)熊本地震調査報告*, **135**, 35-45.
11. 廣田伸之, 溜瀧功史, 2018: 即時的な解説資料における自動震源の活用. *平成28年(2016年)熊本地震調査報告*, **135**, 67-72.
12. 気象庁, 2017: 世界の地震活動(2016年5月~10月). *地震予知連絡会会報*, **97**, 478-504.
13. 気象庁, 気象研究所, 2017: 2016年10月21日鳥取県中部の地震. *地震予知連絡会会報*, **97**, 323-350.
14. 気象庁, 気象研究所, 2017: 東海・南関東地域におけるひずみ観測結果(2016年5月~10月). *地震予知連絡会会報*, **97**, 222-241.
15. 弘瀬冬樹, 前田憲二, 藤田健一, 2016: 紀伊半島南東沖の地震(2016年4月1日, M6.5)による南海トラフ大地震に対する影響. *地震予知連絡会会報*, **96**, 311-316.
16. 気象庁, 気象研究所, 2016: 平成28年(2016年)熊本地震. *地震予知連絡会会報*, **96**, 492-556.

(3) 学会等発表: 127件

1. NAGATA Kohei, Analyses of the temporal change in size distribution of the earthquakes without using “moving window”, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
2. Katsumata, A., K. Miyaoka, T. Tsuyuki, S. Itaba, M. Tanaka, T. Ito, A. Takamori, and A Araya, Slow slips with durations between VLF and short-term SSE, 日本地球惑星科学連合2020年大会, 2020年7月, オンライン
3. Katsumata, A., Y. Yoshida, K. Nakata, K. Fujita, M. Tanaka, K. Tamaribuchi, T. Nishimiya, A. Kobayashi, Sliding direction of the landslide that caused the 1998 Papua New Guinea tsunami, 日本地球惑星科学連合2020年大会, 2020年7月, 千葉県千葉市幕張
4. Yamada, M., D. Chen, K. Tamaribuchi, Automatic hypocenter determination for the 2018 Hualien earthquake sequences, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, 千葉県千葉市幕張
5. Tamaribuchi, K., Automatic identification of airgun signals observed by ocean bottom seismic network, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, 千葉県千葉市幕張
6. Tanaka, Yoshiyuki, Chikara Shibata, Yoshiaki Tamura, Akio Kobayashi, Calibration of portable relative gravimeters toward the detection of gravity signals accompanied by slow slip events, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, 千葉県千葉市幕張

7. Tamaribuchi, K., Y. Iwasaki, K. Iwakiri, and H. Ueno, Evaluation of automatic hypocenter determination (PF method) for dense ocean bottom seismograph networks, AGU Fall Meeting, 2019年12月, アメリカ, サンフランシスコ
8. NAGATA Kohei, Temporal variation in the size distribution of the earthquakes around the large earthquakes in the continental crust of Japan, 2019 AGU Fall Meeting, 2019年12月, アメリカ, サンフランシスコ
9. Tamaribuchi, K. and Y. Kodera, Integration of different observation networks to the IPF hypocenter determination algorithm, 4th International Conference on Earthquake Early Warning, 2019年9月, 韓国, ソウル
10. Tamaribuchi, K., An automatic hypocenter determination system of the JMA unified earthquake catalog, Seminar on high-quality earthquake locations, 2019年6月, 京都府宇治市
11. Tamaribuchi, K., A. Kobayashi, T. Nishimiya, and S. Annoura, Off the Kii Peninsula Shallow Low Frequency Earthquake in 2004 revealed by Ocean Bottom Seismometer, JpGU meeting 2019, 2019年5月, 千葉県千葉市
12. Tamaribuchi, K., Real-time Monitoring System of Earthquakes by Bayesian estimation, ICMMA 2018 "Data Science, Time Series Modeling and Applications", 2019年2月, 東京都中野区
13. Ando, S., Detection of steady crustal deformation associated with locking at plate boundary using InSAR analysis, Joint PI Meeting of Global Environment Observation Mission FY2018, 2019年1月, 東京都中央区
14. Tamaribuchi, K., Real-time monitoring of the 2016 Kumamoto Earthquake sequence by new automatic hypocenter determination method, 12th joint meeting of UJNR on earthquake research, 2018年10月, 熊本県熊本市
15. Hirose, F., K. Maeda, K. Fujita, and A. Kobayashi, Simulation of the Great Earthquakes along the Nankai Trough: An Attempt to Simulate Event History, Slip Areas of the Showa Tonankai / Nankai Earthquakes, Heterogeneous Slip Deficit Rate Distribution, and Long-term Slow Slips, 12th joint meeting of UJNR on earthquake research, 2018年10月, 熊本県熊本市
16. Tamaribuchi, K., A. Kobayashi, T. Nishimiya, and S. Annoura, Shallow Low Frequency Earthquake after the 2004 off the Kii Peninsula Earthquakes revealed by Ocean Bottom Seismometer, International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2018, 2018年9月, 福岡県福岡市
17. Akio Katsumata, Kenji Nakata, Masayuki Tanaka, Kenichi Fujita, Kouji Tamaribuchi, Takahito Nishimiya, and Akio Kobayashi, Rapid magnitude estimation of tsunami earthquakes and detectability of submarine landslide by seismic record, French-Japanese Week on Disaster Risk Reduction, 2017年10月, 東京都
18. Kazuki Miyaoka, Takahiro Tsuyuki, Hisao Kimura, Real-time slow slip monitoring with the Geodetic Data Stacking (GDS) method, IAG-IASPEI Joint Scientific Assembly 2017, 2017年8月, 兵庫県神戸市
19. Satoshi Itaba, Satoshi Annoura, Tetsuo Hashimoto, Noriko Kamaya, and Akio Katsumata, Shallow Slow Slip Event Off the Kii Peninsula, Japan, IAG-IASPEI 2017, 2017年8月, 兵庫県神戸市
20. Katsumata, A., Fast hypocenter determination with a 3D velocity model and its implication for seismicity monitoring, Joint Scientific Assembly of the International Association of Geodesy and the International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior 2017, 2017年8月, 兵庫県神戸市
21. Tamaribuchi, K., Automatic hypocenter determination for the Seismological Bulletin of Japan using Bayesian estimation and its applications, Joint Scientific

- Assembly of the International Association of Geodesy and the International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior 2017, 2017年7月, 兵庫県神戸市
22. 案浦理, 橋本徹夫, 鎌谷紀子, 勝間田明男, Episodic shallow tremor off southeast Mie prefecture and its monitoring, 日本地球惑星科学連合 2017年大会, 2017年5月, 千葉県千葉市
 23. 宮岡一樹, 勝間田明男, 上野寛, 川元智司, 檜山洋平, W-phase analysis by using real-time GNSS 1Hz data, JpGU meeting 2017, 2017年5月, 千葉県千葉市
 24. 小林昭夫, GNSSによる南海トラフ沿いスロースリップの新たな検出手法, 気象庁施設等機関研究報告会, 2021年2月, 東京都
 25. 山田真澄, 溜瀧功史, Stephen Wu, 拡張 IPF 法(IPFx):高精度でユニバーサルな即時震源決定法, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「固体地球科学における即時予測・即時解析のフロンティア:基礎的研究から利活用まで」, 2021年1月, オンライン
 26. 野口恵司, 林元直樹, 溜瀧功史, 小寺祐貴, Hi-net を活用した IPF 法の高度化, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「固体地球科学における即時予測・即時解析のフロンティア:基礎的研究から利活用まで」, 2021年1月, オンライン
 27. 溜瀧功史, 教師ありアンサンブル学習による地震とノイズの自動識別, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「固体地球科学における即時予測・即時解析のフロンティア:基礎的研究から利活用まで」, 2021年1月, オンライン
 28. 中尾風佐, 永井あすか, 馬場久紀, 西宮隆仁, 駿河湾における低周波微動の検出, 日本地震予知学会第7回(2020年)学術講演会, 2020年12月, 東京都港区
 29. 溜瀧功史, ベイズ推定による地震のリアルタイム監視予測システム, 震源物理研究会, 2020年11月, オンライン
 30. 西宮隆仁, 勝間田明男, スロー型津波地震が日本近海で発生した場合に過小な推定値となるマグニチュードの定量的評価, 日本地震学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 31. 小林昭夫, 露木貴裕, GNSS 客観検知手法で検出された最近の南海トラフ沿い長期的スロースリップ, 日本地震学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 32. 田中昌之, 小林昭夫, 勝間田明男, 溜瀧功史, 木村恒久, 久保田俊輔, 依田幸英, 人工的振動による DAS 記録の特徴, 日本地震学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 33. 永田広平, 中谷正生, 吉田真吾, 透過弾性波を用いたガウジ層を含む断層内部状態の観察, 日本地震学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 34. 下條賢梧, 工藤祥太, 岩崎友理子, 溜瀧功史, 畳み込みニューラルネットワークによるノイズ除去と地震検知, 日本地震学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 35. 溜瀧功史, 弘瀬冬樹, 海底地震観測網を活用した自動震源決定による日本海溝沿いの微小地震活動の特徴, 日本地震学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 36. 野口恵司, 林元直樹, 溜瀧功史, 小寺祐貴, Hi-net を活用した IPF 法の高度化, 日本地震学会 2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン
 37. 田中昌之, 小林昭夫, 勝間田明男, 木村恒久, 久保田俊輔, 依田幸英, 光ファイバーセンシング技術を用いた天竜船明観測点での DAS 試験観測, 日本地球惑星科学連合 2020年大会, 2020年7月, オンライン
 38. 露木貴裕, GNSS とひずみデータを同時に使った長期的スロースリップのインバージョン解析, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, 千葉県千葉市
 39. 中尾風佐, 馬場久紀, 西宮隆仁, 鶴我佳代子, 駿河湾における海底地震連続観測 一屈折法地震探査で求められた速度構造による震源の再決定一, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, 千葉市幕張
 40. 西宮隆仁, 勝間田明男, 通常の地震に対するスロー津波地震の応力降下量比の解析, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, 千葉市幕張

41. 小林昭夫, スロースリップ客観検知手法の応用, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, 千葉市幕張
42. 橋本徹夫, 続発する大地震 —南海トラフ地震—, 第24回「震災対策技術展」横浜 災害・危機管理 ICT シンポジウム 2020, 2020年2月, 神奈川県横浜市
43. 溜瀧功史, 海底地震観測網で観測されるエアガンの自動識別法, 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」, 2020年1月, 東京都文京区
44. 中田 健嗣, 勝間田 明男, Abdul Muhari, 2018年インドネシア・スラウェシ島の津波の現地調査高とビデオ記録データから推定された海底地すべり波源, 第9回巨大津波災害に関する合同研究集会, 2019年12月, 大阪府大阪市
45. 田中昌之, 天竜船明長基線レーザーひずみ計のデータ補正に資する水位観測, 「精密地球物理観測ネットワークによる地殻活動の総合的な理解」2019年度研究集会, 2019年12月, 神奈川県小田原市
46. 溜瀧功史, 岩崎友理子, 岩切一宏, 上野寛, 海底地震観測網が一元化自動震源に及ぼす影響, 研究集会”日本における地震発生予測検証実験(CSEP-Japan)”, 2019年11月, 東京都文京区
47. 中田 健嗣, 勝間田 明男, Abdul Muhari, 2018年インドネシア・パル津波の複数の種類の津波記録から推定された海底地すべり源, 日本地震学会 2019年度秋季大会, 2019年9月, 京都府京都市
48. 勝間田 明男, 田中 昌之, スロー津波地震の規模推定手法の検討(4), 日本地震学会 2019年度秋季大会, 2019年9月, 京都府京都市
49. 永田広平, 規模の大きな内陸地震の震源周辺における地震活動の規模別頻度分布変化, 日本地震学会 2019年度秋季大会, 2019年9月, 京都府京都市
50. 橋本徹夫, 横田崇, 世界の大規模地震の続発性—同規模の地震の続発と連動—, 日本地震学会 2019年度秋季大会, 2019年9月, 京都府京都市
51. 西宮隆仁, 小林昭夫, 溜瀧功史, 馬場久紀, 駿河湾における OBS 観測記録への低周波微動検出手法適用の試み, 日本地震学会 2019年度秋季大会, 2019年9月, 京都府京都市
52. 田中昌之, 勝間田明男, 津波地震の規模推定への利用を想定した広帯域地震計・速度型強震計の性能調査, 日本地震学会 2019年度秋季大会, 2019年9月, 京都府京都市
53. 溜瀧功史, 岩崎友理子, 岩切一宏, 上野寛, 海底地震観測網を活用した自動震源決定 (PF 法) の評価, 日本地震学会 2019年度秋季大会, 2019年9月, 京都府京都市
54. 田中昌之, 勝間田明男, 津波地震の規模推定への利用を想定した気象庁広帯域地震計・速度型強震計の長周期帯域のノイズレベルの比較, 日本地球惑星科学連合 2019年大会, 2019年5月, 千葉県千葉市
55. 馬場久紀, 鶴我佳代子, 佐藤比呂志, 石山達也, 篠原雅尚, 西宮隆仁, 阿部信太郎, 駿河湾北部-富士川河口断層帯におけるエアガン-OBS 構造探査 (序報), JpGU meeting 2019, 2019年5月, 千葉県千葉市
56. 曾谷太洋, 馬場久紀, 西宮隆仁, 中尾風佐, 長尾年恭, 駿河湾石花海周辺における OBS 地震観測の b 値について, JpGU meeting 2019, 2019年5月, 千葉県千葉市
57. 中田 健嗣, 勝間田 明男, Abdul Muhari, 2018年スラウェシ島地震時の津波の海底地すべり波源の可能性, 日本地球惑星科学連合 2019年大会, 2019年5月, 千葉県千葉市
58. 勝間田 明男, 中田 健嗣, 小林 昭夫, 弘瀬 冬樹, 西宮 隆仁, 小笠原諸島周辺及びカリブ海小アンティル諸島周辺のマントルウェッジ内 地震活動, 日本地球惑星科学連合 2019年大会, 2019年5月, 千葉県千葉市
59. パナヨトプロスヤニス, 馬場久紀, 西宮隆仁, 曾谷太洋, 中尾風佐, 自己浮上型海底地震計 (OBS) と陸上地震観測網の併合処理による駿河湾周辺の地震活動観測, JpGU meeting 2019, 2019年5月, 千葉県千葉市

60. 西宮隆仁, 勝間田明男, 吉田康弘, 震源スペクトル解析に基づく津波地震(スロー地震)の近地波形の推計とマグニチュードの評価, JpGU meeting 2019, 2019年5月, 千葉県千葉市
61. 中尾風佐, 馬場久紀, 佐藤比呂志, 鶴我佳代子, 坂本泉, 西宮隆仁, 篠原雅尚, 阿部信太郎, 台風24号通過時に駿河湾北部で発生したと考えられる混濁流について—OBSアレイが捉えた海底異常現象の痕跡—, JpGU meeting 2019, 2019年5月, 千葉県千葉市
62. 小林昭夫, 露木貴裕, 2017年から2018年にかけての志摩半島長期的スロースリップ, JpGU meeting 2019, 2019年5月, 千葉県千葉市
63. 橋本徹夫, 横田崇, 世界の大規模地震の続発性—実事例と時空間ETASによる比較, JpGU meeting 2019, 2019年5月, 千葉県千葉市
64. 安藤忍, 小林昭夫, InSAR時系列解析による御前崎、潮岬、室戸岬、足摺岬周辺の定常的な地殻変動2, JpGU meeting 2019, 2019年5月, 千葉県千葉市
65. 溜瀧功史, 一元化震源の最近の検知力と余震予測への活用, 研究集会”日本における地震発生予測検証実験(CSEP-Japan)”, 2019年1月, 東京都文京区
66. 溜瀧功史, ベイズ推定による地震のリアルタイム監視予測システム, 科研費シンポジウム「空間データと災害の統計モデル」, 2019年1月, 京都府京都市
67. 溜瀧功史, 小寺祐貴, 観測網を統合した震源推定手法(IPF法)の検討, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「地震動のリアルタイム解析:防災・減災に向けた即時的な活用を目指して」, 2019年1月, 東京都
68. 中田健嗣・勝間田明男, 2018年9月のインドネシア・スラウェシ島の津波の波源場所の検討について, 第8回巨大津波災害に関する合同研究集会, 2018年12月, 東京都
69. 弘瀬冬樹, 古文書からわかる昔の大地震, 日本気象学会関西支部2018年度第3回例会, 2018年12月, 大阪府大阪市
70. 橋本徹夫, 横田崇, 世界の大規模地震の続発性について, 日本災害情報学会20周年記念大会 日本災害復興学会10周年記念大会合同大会, 2018年10月, 東京都文京区
71. 上野寛, 上田満治, 森脇健, 溜瀧功史, 最近の気象庁一元化震源の動向, 日本地震学会2018年度秋季大会, 2018年10月, 福島県郡山市
72. 馬場久紀, 西宮隆仁, 中田健嗣, 小林昭夫, 勝間田明男, 対馬弘晃, 澤田義博, 笠原敬司, Panayotopoulos Yannis, 阿部信太郎, 曾谷太洋, 中尾風佐, OBS観測による駿河湾の地震活動について—駿河湾における最近の地震活動の特徴—, 日本地震学会2018年度秋季大会, 2018年10月, 福島県郡山市
73. 西宮隆仁, 勝間田明男, 津波地震(スロー地震)の近地波形の推計とそれに基づくマグニチュード推定の考察, 日本地震学会2018年度秋季大会, 2018年10月, 福島県郡山市
74. 露木貴裕, ひずみデータを用いたすべり量分布の解析について, 日本地震学会2018年度秋季大会, 2018年10月, 福島県郡山市
75. 田中昌之, 勝間田明男, 津波地震(スロー地震)規模推定手法の検討(3), 日本地震学会2018年度秋季大会, 2018年10月, 福島県郡山市
76. 安藤忍, 小林昭夫, InSAR時系列解析による太平洋沿岸の岬周辺における定常的地殻変動, 日本地震学会2018年度秋季大会, 2018年10月, 福島県郡山市
77. 勝間田明男, 速度構造の震源決定位置への影響について(3), 日本地震学会2018年度秋季大会, 2018年10月, 福島県郡山市
78. 溜瀧功史, 機械学習によるP波・S波の自動判別, 日本地震学会2018年度秋季大会, 2018年10月, 福島県郡山市
79. 溜瀧功史, ベイズ推定を用いた地震観測データの即時解析と地震カタログへの適用, 2018年度統計関連学会連合大会, 2018年9月, 東京都文京区
80. 花村憲享, 中田健嗣, 馬場久紀, 木村一洋, 長岡優, 小笠原地域の地震火山活動—OBSを用いた西之島の地震観測—, 日本地球惑星科学連合2018年大会, 2018年5月, 千葉県千葉市

81. 橋本徹夫, 案浦理, 池田雅也, 前田憲二, 武田清史, 岩村公太, 横田崇, 大規模地震の連動と大きな前震を伴う大規模地震の発生数について(2), 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018 年 5 月, 千葉県千葉市
82. 中田 健嗣, 勝間田 明男, 山体崩壊による津波の想定事例の検討, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018 年 5 月, 千葉県千葉市
83. 勝間田 明男, 中田 健嗣, 藤田 健一, 田中 昌之, 西宮 隆仁, 小林 昭夫, 吉田 康宏, 1998 年バブアニューギニア津波を起こした海底地すべりは地震計で検知可能か?(2), 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018 年 5 月, 千葉県千葉市
84. 田中昌之, 勝間田明男, 津波地震 (スロー地震) 規模推定手法の検討 (2), 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018 年 5 月, 千葉県千葉市
85. 西宮隆仁, 勝間田明男, スペクトル解析を用いた津波地震 (スロー地震) の震度及び気象庁マグニチュードの考察, JpGU meeting 2018, 2018 年 5 月, 千葉県千葉市
86. 溜瀧功史, 中川茂樹, PF 法自動震源決定による 2011 年東北地方太平洋沖地震前後の震源の再解析, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018 年 5 月, 千葉県千葉市
87. 安藤忍, 小林昭夫, InSAR 時系列解析による御前崎、潮岬、室戸岬、足摺岬周辺の定常的な地殻変動, JpGU meeting 2018, 2018 年 5 月, 千葉県千葉市
88. 小林昭夫, 2017 年後半からの志摩半島長期的スロースリップの可能性, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018 年 5 月, 千葉県千葉市
89. 溜瀧功史, 中川茂樹, 大規模連続地震波形データ解析システムの活用例: 自動震源決定による東北地方太平洋沖地震前後の震源の再解析, データ流通ワークショップ, 2018 年 3 月, 東京都文京区
90. 勝間田 明男, 海溝沿い巨大地震の地震像の即時的把握に関する研究, 東北地方太平洋沖地震総合研究グループ研究集会, 2018 年 3 月, 東京都
91. 溜瀧功史, 地震波リアルタイムモニタリングによる大地震発生後の余震活動等の即時予測の試み, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「地震のリアルタイムモニタリングと予測情報の利活用」, 2018 年 1 月, 東京都文京区
92. 中田健嗣, 藤田健一, 吉田康宏, 林豊, 対馬弘晃, 勝間田明男, 震源過程解析によるすべり分布を用いた 2016 年 11 月福島県沖の地震の津波数値解析, 第 7 回巨大津波災害に関する合同研究集会, 2017 年 12 月, 宮城県仙台市
93. 木村久夫, 宮岡一樹, 東海地方における短期的ゆっくりすべりの ひずみ計による検知能力評価, 日本地震学会 2017 年度秋季大会, 2017 年 10 月, 鹿児島県鹿児島市
94. 宮岡一樹, 木村久夫, 甲斐玲子, 東海～東南海地域における短期的ゆっくりすべりの 時間的推移とすべり量分布, 日本地震学会 2017 年度秋季大会, 2017 年 10 月, 鹿児島県鹿児島市
95. 板場智史, 案浦理, 橋本徹夫, 鎌谷紀子, 勝間田明男, 紀伊半島沖における浅部 SSE, 日本地震学会 2017 年度秋季大会, 2017 年 10 月, 鹿児島県鹿児島市
96. 弘瀬冬樹, 前田憲二, 藤田健一, 小林昭夫, 南海トラフ沿い巨大地震のシミュレーションモデルの高度化, 日本地震学会 2017 年度秋季大会, 2017 年 10 月, 鹿児島県鹿児島市
97. 田中昌之, 勝間田明男, 津波地震 (スロー地震) 規模推定手法の検討, 日本地震学会 2017 年度秋季大会, 2017 年 10 月, 鹿児島県鹿児島市
98. 溜瀧功史, 一元化震源のための自動震源推定手法—2016 年熊本地震を受けた改良, 日本地震学会 2017 年度秋季大会, 2017 年 10 月, 鹿児島県鹿児島市
99. 勝間田明男, 速度構造の震源決定位置への影響について(2), 日本地震学会 2017 年度秋季大会, 2017 年 10 月, 鹿児島県鹿児島市
100. 安藤忍, 奥山哲, InSAR 解析によるフィリピンレイテ島で発生した M6.5 地震に伴う地殻変動, 日本測地学会第 128 回講演会, 2017 年 10 月, 岐阜県瑞浪市

101. 中田 健嗣、小林 昭夫、勝間田 明男、弘瀬 冬樹、馬場 久紀、木村 一洋、長岡 優、対馬 弘晃、前田 憲二、小笠原周辺海域の自己浮上式海底地震計の観測で得られた、二重深発地震面と考えられる震源分布について、JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017年5月, 千葉県千葉市
102. 溜瀧功史, 八木勇治, 自動処理を活用した一元化震源から推定された前震・余震活動の特徴抽出, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017年5月, 千葉県千葉市
103. 中田健嗣, 藤田健一、吉田康宏、林豊、対馬弘晃、勝間田明男, 震源過程解析のすべり分布を使用した、2016年11月福島県沖の地震の津波解析, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017年5月, 千葉県千葉市
104. 勝間田明男, 中田健嗣, 藤田健一, 田中昌之, 溜瀧功史, 弘瀬 冬樹, 小林 昭夫, 津波地震対策について, 日本地球惑星科学連合 2017年大会, 2017年5月, 千葉県千葉市
105. 安藤忍, ALOS-2/PALSAR-2で検出された2016年にイタリアで発生した地震の地殻変動, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017年5月, 千葉県千葉市
106. 小林昭夫, 南海トラフ沿い短期的スロースリップの客観的検知, 日本地球惑星科学連合 2017年大会, 2017年5月, 千葉県千葉市
107. 藤田健一, 勝間田明男, 岩切一宏, 田中美穂, 断層すべり分布のスケーリング則に基づいた自動遠地実体波震源過程解析から得られるすべり量分布, 日本地球惑星科学連合 2017年大会, 2017年5月, 千葉県千葉市
108. 弘瀬冬樹, 前田憲二, 藤田健一, 小林昭夫, 南海トラフ沿い巨大地震のシミュレーション: 不均質なすべり欠損レート分布と昭和東南海・南海地震のすべり分布の再現の試み, JpGU meeting 2017, 2017年5月, 千葉県千葉市
109. 溜瀧功史, 熊本地震 ～地震発生状況の即時把握技術の開発～, 平成28年度気象研究所研究成果発表会, 2017年2月, 東京都千代田区
110. 溜瀧功史, ベイズ推定を用いた自動震源決定の高度化 ―事前確率の改良―, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「地震のリアルタイムモニタリングと情報の利活用」, 2016年11月, 東京都文京区
111. 勝間田明男, 船明レーザーひずみ計の性能評価とGNSS・ボアホール多成分歪計の観測能力, 高精度ひずみ観測ネットワークによる地殻活動モニター研究集会, 2016年11月, 富山県富山市
112. 一ノ瀬里美, 花村憲亨, 馬場久紀, 中田健嗣, 平田賢治, 山崎明, 小林昭夫, 勝間田明男, 対馬弘晃, 前田憲二, 自己浮上式海底地震計(OBS)を用いた駿河湾での連続地震観測について, 海洋理工学会平成28年度秋季大会, 2016年10月, 京都府京都市
113. 花村憲亨, 一ノ瀬里美, 馬場久紀, 中田健嗣, 小林昭夫, 浅原里美, 茂木伸治, 自己浮上式海底地震計の回収支援に向けた小型衛星通信端末の搭載実験について, 海洋理工学会平成28年度秋季大会, 2016年10月, 京都府京都市
114. 溜瀧功史, 弘瀬冬樹, 自動震源を活用した地震活動の統計的特徴即時把握の試み, 第7回研究集会”日本における地震発生予測検証実験(CSEP-Japan)”, 2016年10月, 東京都文京区
115. 宮岡一樹、木村久夫, 東海地域の長期的ゆっくりすべりの推移 ～やや鈍化傾向か～, 日本地震学会 2016年度秋季大会, 2016年10月, 愛知県名古屋市
116. 中田健嗣・勝間田明男・小林昭夫, 1741年渡島大島の津波への簡易予測式の適用性について, 日本地震学会 2016年度秋季大会, 2016年10月, 愛知県名古屋市
117. 溜瀧功史, 波形相関による自動震源の分類, 日本地震学会 2016年度秋季大会, 2016年10月, 愛知県名古屋市
118. 小林昭夫, 木村一洋, 南海トラフ沿い長期的スロースリップの客観的検知, 日本地震学会 2016年度秋季大会, 2016年10月, 愛知県名古屋市
119. 勝間田 明男, 速度構造の震源決定位置への影響について, 日本地震学会 2016年度秋季大会, 2016年10月, 愛知県名古屋市

120. 溜瀧功史, 自動震源を活用した地震活動の統計的特徴即時把握の試み, 日本地震学会 2016 年度秋季大会, 2016 年 10 月, 愛知県名古屋市
121. 安藤忍, 奥山哲, 勝間田明男, 藤田健一, 溜瀧功史, ALOS-2/PALSAR-2 による平成 28 年 (2016 年) 熊本地震の解析, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年 5 月, 千葉県千葉市
122. 勝間田明男, 藤田健一, 溜瀧功史, 安藤忍, 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震の震源分布と震源過程について, JpGU meeting 2016, 2016 年 5 月, 千葉県千葉市
123. 藤田健一, 勝間田明男, 迫田浩司, 遠地実体波震源過程解析によるすべり分布と震源の様々な特徴との関係性, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年 5 月, 千葉県千葉市
124. 中田健嗣, 小林昭夫, 木村一洋, 馬場久紀, 長岡優, 対馬弘晃, 勝間田明男, 前田 憲二, 自己浮上式海底地震計の観測による小笠原諸島周辺の震源決定精度向上について, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年 5 月, 千葉県千葉市
125. 勝間田明男, 中田健嗣, 藤田健一, 田中昌之, 小林昭夫, 吉田康宏 2, 1998 年パプアニューギニア津波を起こした海底地すべりは地震計で検知可能か?, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年 5 月, 千葉県千葉市
126. 勝間田明男, 林豊, 宮岡一樹, 対馬弘晃, 馬場俊孝, 津波警報器の試作(3), 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年 5 月, 千葉県千葉市
127. 宮岡一樹, 勝間田明男, 上野寛, 川元智司, 檜山洋平, GNSS の 1 秒データを用いた W-phase 解析と断層面推定 (2003 年十勝沖地震の事例), JpGU meeting 2016, 2016 年 5 月, 千葉県千葉市

報道・記事

- ・毎日新聞「<熊本地震>その後 13 万回発生 九州 1 年間、前年比 22 倍」(平成 29 年 4 月 9 日)
- ・読売新聞「火山の崩壊で起きる津波、予測へ」(平成 30 年 5 月 28 日)
- ・日本経済新聞「20XX 年、巨大地震が連鎖したら… 富士山は」(平成 30 年 8 月 5 日)
- ・朝日新聞「土砂流入がもたらす津波」(平成 30 年 12 月 24 日)

その他 ((3)「成果の他の研究への波及状況」関連)

- ・気象研究所所長表彰「新たな自動震源決定手法の開発により一元化震源決定業務の改善・効率化に貢献した功績」(溜瀧功史)(平成 29 年 2 月)
- ・気象庁長官表彰「新たな震源推定手法の開発により、緊急地震速報の精度向上及び精密地震解析業務の改善に貢献した功績」(溜瀧功史)(平成 29 年 6 月)

機械学習を用いた地震波検測に関する研究

研究期間：令和元年度～令和2年度

研究代表者：工藤祥太（大阪管区気象台地震火山課）

研究担当者：

〔大阪管区気象台〕飯盛 裕、下條 賢梧

〔地震津波研究部〕溜淵 功史

研究の背景・意義

（社会的背景・意義）

平成28年（2016年）熊本地震、平成30年（2018年）北海道胆振東部地震など、大規模地震及びそれに伴う余震等に対する自動震源は、報道発表資料はもとより地震調査委員会の評価等でも活用されている。また、南海トラフ沿いの地震に関する評価検討においては、地震発生時に余震域の広がりから震源域（主破壊域及び割れ残りの範囲）を推測することや余震活動の活発さの程度を評価することが期待されている。この観点からも、自動震源は重要な役割を果たす。自動震源決定プロセスで用いられる地震波の検測処理を改善できれば、自動震源の精度向上につながる。

ところで昨今、様々な領域で機械学習、とりわけDeep Learningが用いられ、目覚ましい成果を挙げている。これは、ITインフラの発達により、データの転送・保存・処理能力が格段に上がってきたことと、Deep Learningを用いるためのソフトウェアやライブラリが充実してきたことが要因である。気象庁は、地震波形や検測値、震源などのデータを長期間に渡って大量に保有しており、地震についてDeep Learningを活用するのに理想的な状態にある。気象庁ではDeep Learningを用いた業務システムは未だ導入が進んでおらず、本研究はDeep Learningを活用した先進的事例となりうる。

（学術的背景・意義）

地震波の自動検出、検測は、STA/LTA、分散比、Characteristic Function (Allen, 1978) やAR-AIC (横田・他、1981)などを計算し、その変化点を見つけることで行われている。しかし、これらの方法は、様々な変化点を検出するため、地震波とノイズを区別することができず、地震の誤検知・見逃しが発生する場合がある。また、P相とS相の判別は鉛直／水平方向の振幅比によって簡易的に行われているが、十分ではない。これらの問題点を解決すべく、畳み込みニューラルネットワーク（以下、CNN）を用いたP相検測や、CNNを用いたノイズ／P相／S相の識別が提案されている (Ross et al., 2018)。気象庁の保有する日本の地震データについてこれらの手法を適用し、震源精度や地震の検知能力を向上させることができれば、一元化震源カタログのさらなる充実につなげることができる。

（気象業務での意義）

現行の自動震源決定プロセス（PF法、溜淵・他、2016、Tamaribuchi、2018）は2016年4月に気象庁に導入され、地震多発時等における自動震源決定に一定の効果を上げている。しかし、発破やスパイク状のノイズを地震波として誤検知したり、S相をP相として取り間違えたりすることにより、誤った震源を決定してしまうといった課題がある。Deep Learningを用いてこれらの課題を解決することができれば、より信頼性の高い自動震源の提供や、現業の一元化震源決定作業の負担減につながる可能性がある。

研究の目的

気象庁が保有する地震波形、検測値、震源データ等を活用し、Deep Learningを用いて、地震波の識別・検測を行うモデルを構築し、検測・震源精度の向上に資する。

研究の目標

- ・ 機械学習（特にDeep Learning）を行うのに必要な開発環境を構築する。
- ・ 地震波形データおよび検測値データを収集する。
- ・ P相・S相を「検測」するモデルを作成、学習し、精度検証を行う。
- ・ P相／S相／ノイズを「識別」するモデルを作成、学習し、精度検証を行う。
- ・ 連続地震波形データに対して学習済みモデルを適用した場合の、震源精度の検証を行う。
- ・ 地震火山部システムへの導入を見据えた運用プログラムを作成する。

研究結果

(1) 成果の概要

<1年目>

【環境構築】

- 既整備のGPU搭載ワークステーションに、より高速な処理を行えるようSSDを増設。また、Python、CUDAやCuDNN、scikit-learn、TensorFlowなど機械学習・Deep Learning向けのソフトウェアをインストール。また、これらの環境構築手順をドキュメントに残した。

【データ収集】

- データの取得から前処理までの一連の処理を半自動化するプログラムを作成。このプログラムは、マグニチュードや震源フラグを指定すると、検測値周囲の地震波形を取得し、C言語とPythonを連携したwin波形データの高速なデコードを行い、オフセット除去、フィルタ、訓練・検証・テストデータへの分配、規格化、numpyやtfrecordというフォーマットへの変換を行う。
- 2013年～2019年の7年間に、人手で精査検測・簡易検測された日本全国のすべての地震に相当する、約300万個以上の地震波形データ、検測値データを地震観測処理システムから取得し、Deep Learningに利用可能なフォーマットに変換。

【相検測モデルの構築】

- 4秒間の地震波形からP相・S相を検測するCNNモデル（相検測モデル）を作成し、学習させたところ、一元化震源の検測値と比較してP相は0.05秒、S相は0.1秒程度の誤差で検測することに成功。

【相識別モデルの構築】

- 4秒間の地震波形からノイズ/P相/S相を識別するCNNモデル（相識別モデル）を作成し、学習させたところ、テストデータに対しては識別の正解率98.7%を達成。

【連続地震波形データへのモデルの適用】

- 2019年4月1日分の全国の連続地震波形データについて、学習済みのモデルと現行の自動震源決定処理（PF法）を組み合わせて、決定される震源の変化を調べた。
- 相識別モデルと相検測モデルを組み合わせて、連続波形を検測する処理（以下、「CNN検測」）を作成し、PF法の検測処理を置き換えた。その結果、ノイズレベルの高い地震波形などの見逃しが増える一方で、ノイズを地震として誤って検測する事例も増えてしまい、自動震源の精度は現行のPF法より低下した。
- 相識別モデルを、PF法の検測処理の後にノイズ除去処理（以下、「デノイザ」）として追加した。すなわち、PF法による検測値周りの波形を相識別モデルによって識別し、ノイズの確率が高ければその検測値を除去する。その結果、地震波形の見逃しをほとんど増やさずに、ノイズのみを除去でき、秋田付近や台湾付近のノイズによる誤った震源を低減させることができた。
- 発破波形やスパイク状のノイズについては、デノイザによって除去することができなかった。

<2年目>

【システム導入を見据えた運用プログラムの作成】

- データ取得、前処理、モデルの学習、精度検証の一連の流れを主にPythonのプログラムで1つのプロジェクトにまとめ、実行方法などのドキュメントを作成した。
- 学習済みモデルによるデノイザをC言語（TensorFlow C APIを利用）によってPF法に組み込み、気象研サーバ上でルーチンの稼働させた。
- モデルの更新を行う際は、上記プロジェクトでデータの追加、モデルの再学習を行う。学習済みモデルは1つのバイナリファイルとして生成され、これを差し替えれば、再コンパイルの必要なしにデノイザを更新できる。

【相検測モデル・相識別モデルの改良及び精度検証】

- 地震波形に複数のフィルタ処理を行う前処理（フィルタバンク）を行うことで、精度が改善する

か調査を行った。

- ・ モデルへの入力を単入力（2Hz 以上のハイパスフィルタ）ではなく、フィルタバンク（フィルタなし・2-8Hz のバンドパスフィルタ・5Hz 以上のハイパスフィルタ）による 3 入力にしたところ、テストデータに対してはわずかに精度が上がった。
- ・ 連続地震波形データにモデルを適用した場合、フィルタバンクのありの場合は、単入力の場合に比べ、決定される震源について以下のような結果となった。
- ・ デノイザとして適用：現行の PF 法に比べ、正しい震源を減らし、過剰な震源を増やしてしまった。
- ・ CNN 検測として適用：現行の PF 法に比べ、正しい震源はほぼ減らさないが、過剰な震源を増やしてしまった。しかし、過剰な震源のうち多くは実際には一元化震源に登録されていない未知の震源であった。
- ・ 訓練データを増やすことで精度が改善するか調査を行った。
- ・ M2 以上の地震に限定した場合、訓練データを約 30 万個以上に増やしても相識別モデルの精度はほとんど向上しなかった。
- ・ M0 以上の地震に限定した場合、訓練データを約 100 万個以上に増やしても相識別モデルの精度はほとんど向上しなかった。
- ・ M0 以上の地震に限定した訓練データを約 200 万個以上に増やした場合、相識別モデルの学習過程で精度が極端に落ちる、「勾配消失」という問題が発生した。勾配消失への対策として、訓練データをランダムに間引いて削減する、1 エポックのステップ数を小さくしてこまめに学習の早期終了を判定するという調査を行った。
- ・ マグニチュードの範囲により精度が改善するか調査を行った。
- ・ 相識別モデルの、テストデータに対する精度は M0 以上よりも M2 以上の地震に限定したときの方が高かった。しかし、テストデータに対する精度はあくまでも条件を限定したデータに対するモデルの精度である。テストデータに対する精度が高くても、連続地震波形データに適用したときの性能が高くなるとは限らない。
- ・ 連続地震波形データにモデルを適用した場合、M0 以上に限定して学習させたモデルは、M2 以上に限定して学習させたモデルに比べ、決定される震源について以下のような結果となった。
- ・ デノイザとして適用：現行の PF 法に比べ、正しい震源は変わらず、過剰な震源を増やしてしまった。
- ・ CNN 検測として適用：現行の PF 法に比べ、正しい震源を増やすことができたが、過剰な震源も増やしてしまった。しかし、過剰な震源のうち多くは実際には一元化震源に登録されていない未知の震源であった。
- ・ 連続地震波形データに CNN 検測（M0 以上、フィルタバンクあり）を適用した結果、一元化震源よりも過剰に震源が決まってしまった。しかし、過剰な震源を目視で精査したところ、その過半数が一元化震源に登録されていない未知の震源であった。また、過剰な震源のうちこの未知の震源を除くと、ほとんどは発破による震源であった。さらに、現行の PF 法よりもノイズによる誤った震源を削減できていた。
- ・ 発破波形について除去するために、地震観測処理システム内に保存されている 2017 年 8 月～2020 年 8 月の発破登録の検測値および波形を収集し、P 相／発破識別モデルを学習させた（M0 以上、フィルタバンクあり）。
- ・ CNN 検測のうち、P 相／発破識別モデルで発破の確率が高い検測値を除去すると、発破による震源の 7 割程度が削減できた。

（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**(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)**

◎ 短い期間のフィジビリティ研究として、得られた成果や課題を次の計画につなげることを想定して進めていただきたい。

⇒ データの収集や前処理、モデルの学習を含めた機械学習システムを1つのプロジェクトにまとめ、ドキュメントを作成したことによって、今後の計画に再利用しやすくした。これにより、データ条件の設定を変えるだけで目的（発破・低周波地震の識別など）に応じたモデルの学習が容易にできる。

◎ 業務化に至るまでの中期的な研究目標の設定も別途検討すべきである。

⇒ まずは、P相・S相の「検測」モデルとノイズ/P相/S相の「識別」モデルを構築し、それぞれテストデータに対する精度を求めるという目標を決めて取り組んだ。その後、これらのモデルを現行のPF法に組み込むための開発に取り組んだ。

◎ 機械学習とはいえ、問題の本質を人間が把握しておくことは重要であり、研究遂行中に発生した課題や問題点の整理は十分に行っておくべきだろう。

⇒ 単純に一元化検測値まわりの波形データだけでモデルを学習させた場合は、発破波形、スパイク状のノイズを誤って検測してしまうことを確認した。また、発破波形を学習データに追加してやることで、ある程度発破波形の検測を抑えられることを確認した。フィルタバンクなどの前処理や、学習に用いる地震データのマグニチュードの範囲によって、モデルの性能がどう変化するかを確認した。

◎ 今後、両方向（CNN検測とデノイザ）からの検測手法の完全を図り、地震業務に導入できるよう、期待する。

⇒ M2以上の地震データで学習させた際には、CNN検測よりデノイザとして利用した方が、現行のPF法よりも正しい震源をあまり減らさずに、過剰な震源を減らすことができ、有望であった。しかし、M0以上の地震データで学習させた際には、デノイザとして利用するとM2以上の時よりも過剰な震源が増えてしまった。一方、CNN検測として利用すると、現行のPF法よりも正しい震源を増やすことができたが、過剰な震源も増やしてしまった。しかし、CNN検測を利用したときの過剰な震源の内訳を確認してみると、実際には一元化震源カタログに登録されていない未知の震源が過半数を占めた。この未知の震源を除くと、誤った震源の大半は発破によるものであった。そこで、P相/発破識別モデルを別途学習させ、CNN検測の後に発破除去処理として適用すると、未知の震源の個数はそのままに、発破による震源を7割近く削減することができた。

◎ 学会での発表、本庁等への情報共有を進めるとともに、論文化、報道発表等も行っていきたい。ぜひとも成果を論文に仕上げるよう、ご指導をよろしくお願ひしたい。大阪管内だけのことではないので、積極的に本庁にもアピールして頂きたい。来年度はぜひ課題をクリアし論文等にまとめた上で業務化を目指してください。

⇒ 2019年度、2020年度の地震学会秋季大会でポスター発表を行った。また、研究集会での口頭発表や、本庁における地震火山技術検討会での発表も行った（詳しくは6.1研究成果リストを参照）。

(5) 今後の課題

- ・依然として、スパイク状のノイズなどは地震として誤って検測してしまうことが多い。ノイズデータは検測値として気象庁のシステム上に残らないため、大量に収集することが難しく、モデルの学習データに与えることができなかった。今後、現業の協力を得て、様々な種類のノイズを集めたデータベースを作ることが望まれる。

- ・地震波形やノイズの事例を追加すると、自動で機械学習モデルがアップデートされ、自動震源決定処理の性能評価まで行うようなシステムを構築したい。こうすることで、新たに追加した事例によって自動震源決定処理がどう向上/悪化するかのフィードバックがすぐに得られ、ノイズ事例収集などのモチベーションも上げることができる。

- ・遠地地震、低周波地震を識別できるようにしたい。この際、本研究のように1地点・4秒間の波形だけで識別するのではなく、複数地点・10秒間以上の波形を用いるという工夫が考えられる。

- ・CNN検測において、相識別の閾値を低くすると、一元化震源にない過剰な震源が増える傾向があっ

た。本研究では、ある一つの閾値について、過剰な震源の中に未知の震源が含まれることを確認したが、閾値をさらに低くした場合に増える過剰な震源に、より多くの未知の震源が含まれているのではないかとすることを精査したい。

- ・2016年4月14日～2016年4月29日の熊本地震発生後の、地震が大量に連発していた時期については、モデルによるデノイザはほとんど機能せず、一元化震源にない過剰な震源を減らすことができなかった。このことから、データの領域、期間を変えるなど、様々な条件で性能を評価する必要がある。

- ・本研究では一元化震源と比較して震源数がどう変化するか、という点に絞って性能評価をした。さらに深く震源精度の変化を議論するためには、計算された震源と一元化震源の緯度経度や深さ、マグニチュードについての残差を統計的に評価する必要がある。

- ・現行のPF法に比べ、P相とS相の取り間違いが改善したかを定量的に評価する必要がある。

- ・気象研サーバ上でルーチン化したのは、現行のPF法にデノイザを組み込んだものについてのみである。PF法の検出処理を完全にCNN検出で置き換えたものもルーチン化したい。

自己点検

(1) 到達目標に対する達成度

- ・機械学習を行うのに必要な開発環境の構築は研究の初期段階で行い、2年間の研究途上で必要に応じて環境の改善を行った。また、今後活かせるよう環境構築についてのドキュメントを作成した。
- ・地震波形データや検出値データを一回きりの作業で大量に取得するだけでなく、再現性が得られるように、条件を指定して簡便にデータを取得し直せるようなプログラムを作成した。また、データの前処理についても設定により簡単に条件を変更して再実行できるようなプログラムを作成した。また、これらのドキュメントを作成した。
- ・相検出モデルについては、一元化震源の検出値と比較してP相は0.05秒、S相は0.1秒程度の誤差で検出することに成功。
- ・相識別モデルについては、識別の正解率98.7%を達成。
- ・連続地震波形データに対してモデルをデノイザやCNN検出として適用した場合のそれぞれについて、震源数の変化を評価した。CNN検出については、P相/発破識別モデルと組み合わせることで、現行のPF法よりも未知の震源を多く検出できる上、ノイズによる誤った震源を削減できることが分かった。
- ・地震火山部システム導入を見据え、相識別モデルをデノイザとしてPF法に組み込み、気象研サーバ上でルーチン的に稼働させた。
以上より、当初掲げた目標についてはおおむね達成できたと考える。

(2) 到達目標の設定の妥当性

- ・Deep Learningにおいては、開発環境や大量のデータ取得・処理が重要であるため、これらを目標の一項目として明確に意識する必要があった。
- ・機械学習モデルは学習用データに対しては精度が高くとも、実運用データに対してはさほど性能が出ないということもあり、学習用データ・連続地震波形データのそれぞれについて精度を確認する必要があった。
- ・学習済みモデルを本番運用にどのように適用するか（実運用できるのか）というノウハウを得る必要があった。
これらの観点から、到達目標の設定は妥当であったと考えられる。

(3) 研究の効率性（実施体制、研究手法等）について

- ・担当者が少数であることで意識・知見の共有が容易にでき、むしろ研究が進めやすかった。一方、手作業でたくさんの事例を見る場合には不利であった。
- ・チャットシステム（2019年度はMattermost、2020年度はMicrosoft Teams）を活用することにより、気象研究所と大阪管区の担当者間で緊密で対話的なやり取りができ、疑問点の解消や項目の洗い出し、考察のブラッシュアップに大変役立った。
- ・Python言語を用いることで、広く一般に用いられているデータ処理、統計解析、機械学習についてはライブラリが活用でき、効率的にやりたいことを実装することができた。

- 開発したプログラム等はGitLabというGitリポジトリマネージャーで管理し、Webブラウザからドキュメントやソースコードの変更履歴を容易に参照できるようにした。これにより、同じネットワーク上であれば、管区・気象研のどの端末からでも効率的に情報共有ができた。

(4) 成果の施策への活用・学術的意義

今後、地震火山部の自動震源決定処理に本研究の成果を組み込むことができれば、誤った震源の削減や、これまで検知できなかった地震の検知ができるようになると考えられる。これにより、自動震源の精度が向上し、地震活動の評価に資することができる。また、一元化震源決定作業の負担減や、一元化震源カタログのさらなる充実を図ることができる。

(5) 総合評価

気象庁内にDeep Learningを用いた研究事例がほとんどない中、担当者間で様々な情報を調べ、開発環境の整備からデータ収集、モデルの学習、評価、現行の自動処理への組み込みまで行い、部内外での発表も複数回行うことができた。Deep Learning活用の先進的事例として十分成果を挙げたと考える。

研究成果リスト

(1) 査読論文：0件

特になし

(2) 査読論文以外の著作物（翻訳、著書、解説）：0件

特になし

(3) 学会等発表：5件

1. 工藤祥太，下條賢梧，溜淵功史，畳み込みニューラルネットワークによる地震／ノイズの識別（ポスター発表），日本地震学会2019年度秋季大会，2019年9月，京都府京都市
2. 工藤祥太，下條賢梧，溜淵功史，畳み込みニューラルネットワークによる地震／ノイズの識別【依頼講演】，震源物理研究会，2019年11月，大阪府大阪市
3. 工藤祥太，下條賢梧，溜淵功史，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，2019年度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」，2020年1月，東京都文京区
4. 工藤祥太，下條賢梧，溜淵功史，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【依頼講演】，東京大学地震研究所共同利用研究集会「AIはどのように地震学を加速させるか」，2020年3月，東京都文京区
5. 下條賢梧，工藤祥太，岩崎友理子，溜淵功史，畳み込みニューラルネットワークによるノイズ除去と地震検知，日本地震学会2020年度秋季大会，2020年10月，オンライン

報道・記事

特になし

その他（(3)「成果の他の研究への波及状況」関連）

特になし