

研究課題	(D課題) データ同化技術と観測解析技術の高度化に関する研究 副課題1：衛星データの同化及びリモートセンシング技術の高度化 副課題2：次世代メソスケールデータ同化およびアンサンブルシステムの高度化 副課題3：顕著現象の実況監視とメカニズム解明・予測のための地上リモートセンシング技術の開発
研究期間	令和6年度から5年間（5年計画第3年度）
担当者	○岡本幸三 気象観測研究部長 (副課題1) [気象観測研究部] ○山崎明宏、石橋俊之、工藤玲、岡部いづみ、田上雅浩、太田芳文、近藤圭一、岡本幸三、林昌宏(併任) [気象予報研究部] 大河原望 [火山研究部] 石元裕史 (副課題2) [気象観測研究部] ○川畑拓矢、堀田大介、太田芳文、幾田泰醇、近藤圭一、星野俊介、小野耕介、瀬戸里枝、寺崎康児、井上卓也、山下翔大、田上雅浩、瀬古弘、澤田謙(併任)、横田祥(併任)、佐谷茜(併任) [研究連携戦略官] 藤田匡 [気象予報研究部] 大泉伝 (副課題3) [気象観測研究部] ○酒井哲、西橋政秀、及川栄治、永尾隆、瀬古弘、北川隆洋(併任)、吉田智(併任)、坂梨貴紀(併任) [気象予報研究部] 田尻拓也 [台風・災害気象研究部] 荒木健太郎
目的	<p>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。</p> <p>(副課題1) 衛星データの同化及びリモートセンシング技術の高度化 全球データ同化手法や衛星同化の改善による「主に全球大気数値予報システムを用いた解析・予測の高精度化改善」、衛星を用いた火山灰物質推定や火山灰雲の物理量推定による「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。</p> <p>(副課題2) 次世代メソスケールデータ同化及びアンサンブルシステムの高度化 メソスケールの激しい大気現象の予測可能性向上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」を目的とする。</p> <p>(副課題3) 顕著現象の実況監視とメカニズム解明・予測のための地上リモートセンシング技術の開発 次世代水蒸気ライダーの開発等による「大気下層の水蒸気観測技術の確立」、観測データを用いた「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精度向上」、「火山噴火や森林火災等エアロゾル監視のための地上リモートセンシング技術の開発」を目的とする。</p>
目標	<p>目的を達成するため、以下を行う。</p> <ul style="list-style-type: none"> シビア現象の予測精度の向上のためのデータ同化技術の改良やアンサンブル予報技術の開発（副課題1, 2） 次期静止気象衛星ひまわり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） 水蒸気やエアロゾルなどの観測技術の開発とその有効性の評価、新しい観測データ選択法の開発（副課題1, 2, 3） <p>(副課題1) 衛星データの同化及びリモートセンシング技術の高度化 ① 衛星データ同化の改良 ・全天候域での衛星輝度温度同化など、衛星同化手法の高度化や、新規衛星データの導入・同化改良を行う。ひまわり後継衛星等の将来の衛星観測を想定し、OSSE等を実施して、新規観測データの同化観測やインパクト評価を行う。</p>

	<p>② 全球データ同化システムの改良</p> <ul style="list-style-type: none"> ・アンサンブルを用いた全球データ同化手法の開発・改良や、誤差統計処理の高度化や結合同化などによる観測情報の拡充、観測インパクト評価の高度化、海洋結合同化の高度化を行う。 <p>③ 衛星・地上観測による大気中物質のリモートセンシング技術に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> ・A-Train の後継衛星 (EarthCARE、AOS)、次期静止気象衛星を用いてエアロゾルの推定手法を開発し、地上リモートセンシングによる検証手法を確立することで、包括的な観測によってエアロゾルの時空間変動の把握を目指す。 ・各種全天カメラとスカイラジオメータを用い、雲の放射に関する全てのパラメータ (3次元分布、熱力学的相、微物理・光学特性) を観測する地上システムを開発する。また、全天カメラを用いた雲の無人観測システムを開発する。 ・太陽光・月光観測分光放射観測技術の開発を行い、昼夜間のエアロゾルの変動 監視技術を確立する。また、エアロゾル組成推定技術を利用し、エアロゾル光学特性の空間・時間分布を解析することで、大気放射場の変動の要因を明らかにする。 ・大気プロファイル推定技術の向上とその情報利用の高度化のため、衛星搭載の多波長センサーやサウンダにおける効果的な観測データ情報圧縮・抽出方法を、AI 技術を活用して開発し、解析システムを整備する。実データでの試行により、手法の有用性を評価する。 ・赤外サウンダデータを用いた火山灰情報の高度化を行う。 ・ひまわり等イメージャの赤外チャンネルを使った火山灰推定 (OVAA) の精度を向上させる。 ・推定結果を気象庁移流拡散モデル (JMA-ATM) に利用する。 <p>(副課題2) 次世代メソスケールデータ同化及びアンサンブルシステムの高度化</p> <p>① 非線形・非ガウス性が卓越する顕著現象に対する予測可能性の向上</p> <ul style="list-style-type: none"> ・非線形性・非ガウス性が卓越している顕著現象の予測可能性を向上すべく、データ同化システムの高度化を図る。 <p>② 高度な観測データ同化手法の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高頻度・高密度な観測データを同化する手法を開発するとともに、新規観測データの同化手法を開発する。 <p>③ アンサンブルシステムによる豪雨予測</p> <ul style="list-style-type: none"> ・豪雨予測を精度良く行うアンサンブルシステムの開発およびアンサンブル情報の高度利用法を開発する。 ・先端 AI 技術を活用する開発を行う。 <p>(副課題3) 顕著現象の実況監視とメカニズム解明・予測のための地上リモートセンシング技術の開発</p> <p>① 顕著現象のメカニズム解明・予測のための地上リモートセンシング技術の開発と実証実験</p> <ul style="list-style-type: none"> ・大気下層をターゲットとした、高精度かつ小型・低コストで多点展開できる地上リモートセンシング観測技術を開発する。 ・豪雨発生域の風上 (地上、洋上) 等で実証実験を行い、観測データ質の評価、現象解析、データ同化による予測インパクト調査、実況把握への利用を行う。 <p>② 実況監視とメカニズム解明・予測に有望なデータの特性と有効性の調査</p> <ul style="list-style-type: none"> ・予測に有望なデータの選択法の調査と開発を行う。 ・新しい観測データの特性調査、同化手法の開発を行う。 ・地上リモートセンシングを用いた水蒸気・雲の推定技術開発を行う。 <p>③ 気候変動に影響を及ぼす火山噴火や森林火災、人為起源エアロゾル監視のための地上リモートセンシング技術の開発と観測</p> <ul style="list-style-type: none"> ・全球規模で気候変動に影響を及ぼす成層圏エアロゾルの観測と放射効果の評価、地球システムモデル、火砕物移流拡散モデルの検証を行う。
研究の概要	<p>(副課題1) 衛星データの同化及びリモートセンシング技術の高度化</p> <p>① 衛星データ同化の高度化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・全球モデルとメソモデルについて、全天候、全表面 (陸・雪氷) における輝度温度同化やその高度化を行う。DWL 同化の高度化と他観測との補完性を調べる。また、ハ

イパーサウンダの多チャンネル情報有効活用、機械学習を用いた高頻度・高密度観測利用や情報圧縮、リトリーバルに取り組む。

- ・雲降水レーダー、小型衛星（TROPICS等）やMTG、Metop-SG等の新規衛星について情報を収集し、観測データの特性を調査したうえで、利用できそうな衛星について同化手法を開発する。
- ・これらの同化に際し、モデルや観測演算子のバイアス等の特性を調査する。
- ・ひまわり後継衛星やJAXA将来衛星等のOSSEを行い、それらのインパクトや他観測との相乗効果を調査する。

② 全球データ同化システムの高度化

- ・同化手法の高度化として、アンサンブル同化や4次元背景誤差時間推進の高度化、粒子近似等の高次の誤差統計モーメント導入、水物質の制御、水物質導入等による観測演算子の高度化、アンサンブルによる大気と海洋や陸面との結合同化、モデル誤差を考慮した手法の開発に取り組む。
- ・観測情報の拡充として、流れ依存性に関する誤差統計の高度化、水物質関連観測（雷観測等）の同化の拡充、結合同化により陸面温度や海面水温等も解析することにより、境界（陸面、海洋等）付近の観測情報の活用、高密度な時空間情報の考慮、衛星風・台風ポーガスなどのリトリーブ量から直接同化への高度化を実施する。
- ・数値予報及び観測システムの評価とデザインの高度化について、疑似真値場やアンサンブル等を用いた観測インパクト評価研究を行う。また、複数のOSSE手法を調査し、より堅牢な実験手法を構築する。OSSEシステムを用いて、将来全球観測網のデザインを検討する。
- ・結合同化の高度化について、大気同化部分の高度化、海洋観測からの大気情報をより多く活用するための手法を開発する。

③ 衛星・地上観測による大気中物質のリモートセンシング技術に関する研究

- ・A-Train後継衛星（EarthCARE、AOS）、次期静止気象衛星（イメージャ・赤外サウンダー）のエーロゾルの推定手法を開発する。その解析結果を使って地球システムモデルの比較検証を行う。
- ・全天カメラとスカイラジオメータを使って雲の分布・熱力学的相・微物理・光学特性を推定する手法を開発する。また、全天カメラによる雲の無人観測システムを確立する。
- ・地上放射観測網（福岡、つくば、南鳥島）において、分光放射計及び大気の現地測定による地上エーロゾル光学特性連続観測を実施し、黄砂粒子や黒色炭素の発生、大陸からの汚染大気輸送を考慮した観測を実施する。
- ・太陽光・月光観測分光放射計により、昼夜間のエーロゾルの変動監視技術の開発を行う。
- ・気象研究所の地上放射観測網（福岡、つくば、南鳥島）と気象庁精密日射・放射観測網（網走、石垣島、南鳥島）の分光放射計による観測データからエーロゾルの組成推定、エーロゾル光学特性の空間・時間分布を解析する
- ・赤外サウンダが観測した火山灰雲の赤外輝度温度スペクトル情報から、火山灰物質情報（複素屈折率）を推定する。その情報をもとに火山灰粒子モデルを決定し最適火山灰解析（OVAA）によるひまわりイメージャ解析を実施することでひまわりイメージャによる火山灰推定精度の向上を図る。
- ・ひまわりとGCOM-Cなど異なる観測特性を持つ衛星データを複合的に利用することで、ひまわり単体では得られなかった火山灰推定を実現する。

（副課題2）次世代メソスケールデータ同化及びアンサンブルシステムの高度化

① 非線形・非ガウス性が卓越する顕著現象に対する予測可能性の向上

- ・粒子フィルターやiterative Kalman smootherなどの非線形性を考慮するデータ同化手法の開発を行う。
- ・非ガウス型背景誤差を扱えるよう現業同化システムを拡張し、水蒸気・水物質関連の効果的な同化を目指す。さらに大気の水蒸気・気温・運動量とバランスする水物質の初期値作成を行う。
- ・衛星輝度温度やレーダー画像等の非ガウス・稠密な面的データを同化可能とするために変分自己符号化器を用いて分布のガウス化と次元圧縮を実現する手法を確立する。

	<p><u>②高度な観測データ同化手法の開発</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・メソ解析における赤外サウンダデータ、二重偏波レーダー、地上マイクロ波放射計等のリモートセンシング観測データ同化手法の高度化を行う。 ・GNSS 偏波掩蔽観測、水同位体比観測データなど新規観測データ同化手法の開発を行う。 ・地上設置型マイクロ波放射計データやゾンデ BUFR 報などの高頻度・高密度観測データを有効活用するために時空間における観測誤差相関を考慮する手法の開発を行う。 <p><u>③ アンサンブルシステムによる豪雨予測</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・既存システムの高度化として、EDA、LETKF、EnVar、SV、BGM などの開発を行う。 ・大アンサンブルシミュレーションデータを用いた顕著現象のメカニズム解明や、気象災害に対する高精度確率情報の作成、少数アンサンブルとの比較など、アンサンブルデータの利用について高度化を図る。 <p>(副課題3) 顕著現象の実況監視とメカニズム解明・予測のための地上リモートセンシング技術の開発</p> <p><u>① 顕著現象のメカニズム解明・予測のための地上リモートセンシング技術の開発と実証実験</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・次世代型水蒸気ライダー (DIAL) を開発し、豪雨発生域の風上 (地上、洋上) 等で観測を実施する。 ・得られた観測データ質の評価、品質管理方法の開発、実況把握への利用を行い、大気海洋部が3次元実況監視ツールを開発する上で参考となる地上リモートセンシング観測の利活用状況について情報提供を行う。さらに、線状降水帯を含めた顕著現象に有効な実況監視手法についても情報共有を行う。 ・ライダーによる水蒸気・雲・エアロゾルの同時推定のアルゴリズム開発を行う。 ・ライダーで観測された水蒸気、雲、エアロゾルの高度情報とマイクロ放射計等から観測される鉛直積算雲水量や可降水量などの観測データを用いて、雲の生成・維持過程に関する関係解析やメカニズム解明を行う。 <p><u>②地上リモートセンシングを用いた水蒸気観測データ利用技術に関する研究</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・大気海洋部からの併任者など本庁担当者と連携して、地上マイクロ波放射計観測による輝度温度や放射計算によって求めた可降水量や温度・水蒸気プロファイルなどを大気海洋部と情報基盤部に提供する。また同様に知見の共有や3次元実況監視ツールの開発にもデータ提供等の協力を行う。 <p><u>③ 火山噴火や森林火災等エアロゾル監視のための地上リモートセンシング技術の開発</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・EarthCARE 衛星 (2024 年打ち上げ)、GOSAT シリーズ衛星、AOS 衛星プロジェクト等のデータ検証を行う。 ・将来の衛星観測も見据えた最適な実況監視のための地上リモートセンシング観測システムの開発を行う。
<p>研究の有効性</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・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データ解析支援の要望に対し、エアロゾルの粒径分布や光吸収特性等の解析についての助言を通して、地球環境変動監視の強化に貢献する。(副課題1) ・様々な測器で水蒸気の時・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・予測を向上させ、被害の軽減に貢献できる。(副課題3) ・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。これまでに、アンサンブル変分法同化や観測誤差最適化、観測感度解析手法などを数値予報課に提供してきた。(副課題1)

	<ul style="list-style-type: none"> ・衛星データ同化も、数値予報の改善に向けて不可欠であり、利用の高度化や新規データの有効性の実証などが数値予報課から要望されている。これまで陸面マイクロ波射出率の動的推定、静止衛星 CO2 バンドの晴天輝度温度同化、全天候での赤外輝度温度同化、衛星搭載風ライダー同化の知見を数値予報課に提供してきた。また、ハイパーサウンダの再構築輝度温度同化など、現業利用に先立つ重要な調査を行い、知見を数値予報課に共有している。(副課題 1) ・新規衛星・観測に対する OSSE は、観測システムの設計や早期の現業的データ利用に有効である。特にひまわり後継衛星に搭載されるハイパースペクトルサウンダのインパクト評価を本庁・気象研の他部室と共同で行い、客観的な検討材料の作成や仕様の決定に大きく貢献した。(副課題 1, 2) ・これまで気象庁では局地解析がハイブリッド化され、現在メソ解析のハイブリッド化の検討が進められている。本副課題においては非ガウス性を考慮したハイブリッドシステムの開発や、アジョイントを用いないデータ同化システムの開発を行い、次世代あるいは次々世代の現業データ同化・アンサンブルシステムの高度化へ貢献するとともに、観測データ利用手法の高度化によって現システムへの貢献を図る。さらに高度なアンサンブルシステムによってメソおよび局地アンサンブルの高度化に資する開発を行う。(副課題 2) ・先端 AI 技術の利用や開発は喫緊の課題であり、数値予報課より貢献を要望されている。アンサンブルやデータ同化への利用を目的に開発を行う。(副課題 2)
令和 8 年度 実施計画	<p>(副課題 1) 衛星データの同化及びリモートセンシング技術の高度化</p> <p>① 衛星データ同化の高度化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・全天候域の赤外輝度温度の全球データ同化を、ハイパースペクトル赤外サウンダや MSG, GOES など他の静止気象衛星に適用し、さらに処理を高度化する。この過程で、モデルバイアス特性についても調査し、モデル開発者と共有する。ハイパースペクトル赤外サウンダの利用の高度化のためのシステム改良を継続し、またそれによる予報精度への有効性について調査する。マイクロ波センサー輝度温度の全球同化について、陸域・雪氷域射出率推定の改良、地表面の取り扱いの影響調査、及びそれらに係る品質管理の高度化・改良を行う。 ・ Aeolus 衛星同化処理の改良や、台風や線状降水帯の顕著現象への同化インパクト評価や成果の取りまとめを行う。 ・ひまわり 10 号や将来の衛星搭載風ライダー等の利用について調査する。 ・全球データ同化システムにおいて EarthCARE 衛星搭載雲レーダーや小型衛星搭載マイクロ波センサーに関して、同化処理の開発を進める。 <p>② 全球データ同化システムの高度化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・同化手法の高度化として、アンサンブル同化を全球雲許容数値予測モデルやデータ駆動モデル等によって精緻化し、解析や予測精度の向上を図る。 ・観測情報の拡充として、境界（陸面、海洋等）付近の観測の同化等を高度化し、解析場や解析、予測精度の変化を評価する。 ・数値予報及び観測システムの評価とデザインの高度化として、OSSE システムを用いて将来全球観測網のデザインの検討等を進める。 ・結合同化の高度化として、大気と他媒質間の同時確率密度関数を取り扱える同化システムの構築、解析や予報精度の検証等を進める。 <p>③ 衛星・地上観測による大気中物質のリモートセンシング技術に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ EarthCARE 衛星のエーロゾルプロダクトを開発し、地上観測によって検証する。 ・ 2 台の全天カメラと静止気象衛星を使って雲の三次元分布を推定する手法を高度化する。 ・ 地上放射観測網（福岡、つくば、南鳥島）において、分光放射計及び大気の現地測定による地上エーロゾル光学特性連続観測を実施する。 ・ 太陽光・月光観測分光放射計による昼夜間観測データの解析を進める。 ・ 大気プロファイル推定技術の向上とその情報利用の高度化のため、衛星搭載の多波長センサーおける AI 技術を応用した観測データ情報圧縮・抽出アルゴリズムを開発する。 ・ 衛星赤外サウンダ IASI や CrIS の観測に対応した放射伝達モデルを用いて輝度温度

スペクトルから火山灰物質（複素屈折率）の推定を行い、その結果にもとづき Himawari や GCOM-C による火山灰判定条件や解析アルゴリズムの改良を行う。解析結果を EarthCARE など衛星ライダーデータを用いて検証し、また火山 2 研の JMA-ATM へのデータ同化によって改良の効果を確認する。

（副課題 2）次世代メソスケールデータ同化およびアンサンブルシステムの高度化

① 非線形・非ガウスを考慮する同化システムの開発

- ・ LETKF-PF ハイブリッドフィルターなどの非線形性を考慮するデータ同化手法の開発を行う。
- ・ 機械学習を用いて大気の水蒸気・気温・運動量とバランスする水物質の初期値作成手法を開発する。
- ・ 機械学習技術を応用した非ガウス・稠密な観測データを同化可能とする手法を開発する。

② 高度な観測データ同化手法

- ・ メソ解析における赤外サウンダデータ、二重偏波レーダー、マイクロ波放射計等のリモートセンシング観測データ同化手法の高度化を行う。
- ・ GNSS 観測、水同位体比観測データなど新規観測データ同化手法の開発を行う。
- ・ 時空間における観測誤差相関を考慮する手法の開発を行う。

③ アンサンブルシステムによる線状降水帯や豪雨の予測

- ・ 既存システムの高度化として、EDA、LETKF、EnVar、SV、BGM などの開発を行う。
- ・ 大アンサンブルシミュレーションデータを用いた顕著現象のメカニズム解明や、気象災害に対する高精度確率情報の作成、少数アンサンブルとの比較など、アンサンブルデータの利用について高度化を図る。
- ・ 先端 AI 技術を用いた大アンサンブルや超解像技術の開発、顕著現象のメカニズム解明に取り組む。

（副課題 3）顕著現象の実況監視とメカニズム解明・予測のための地上リモートセンシング技術の開発

① 顕著現象のメカニズム解明・予測のための地上リモートセンシング技術の開発と実証実験

- ・ 暖候期（5 月～10 月）に長崎市野母崎において、線状降水帯をターゲットとした水蒸気 DIAL 観測を行う。
- ・ 気象研究所露場において、DIAL 観測データの品質評価を設置型水蒸気ラマンライダーやラジオゾンデ観測等との比較により行う。
- ・ DIAL 観測データとドップラーライダー、地上観測データ等と合わせた現象解析、データ同化による予測へのインパクト調査を行う。

② 実況監視とメカニズム解明・予測に有望なデータの特性と有効性の調査

- ・ これまで収集した GNSS 視線データやレーダー屈折率などの新しい観測データについて、データの特性調査と品質管理法の開発を継続する。新しい観測データの線状降水帯を含めた顕著現象の実況監視への有効性を調べ、有効性が確認できた場合には監視手法の開発を行う。中間取りまとめを行う。
- ・ 大気海洋部からの併任者などの本庁担当者、台風・災害気象研究部と連携し、地上マイクロ波放射計で観測された輝度温度や放射計算によって求めた可降水量や温度・水蒸気プロファイルなどについての知見をまとめ、大気海洋部や情報基盤部と共有する。
- ・ 予報を効果的に改善する観測データの配置法について、初期的な手法を提案し、すでに解析された顕著事例に適用して、効果を調べる。中間取りまとめを行う。

③ 気候変動に影響を及ぼす火山噴火や森林火災、人為起源エアロゾル監視のための地上リモートセンシング技術の開発と観測

- ・ エアロゾルライダー観測による大規模火山噴火や森林火災等の大気影響の連続監視を実施する。それにより、地上・衛星ライダー観測によるエアロゾルと火山灰のプロダクト作成を行い、EarthCARE 衛星搭載ライダーや気象庁移流拡散モデル、MRI-ESM3 の検証に役立てる。

「課題解決型研究」