

プロフィールシート（事前評価）

研究課題名：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：2024～2028年度（5年間）

研究代表者：石元裕史（気象観測研究部長）

研究担当者：（副課題代表）岡本幸三 川畑拓矢 山崎明宏 酒井哲

1. 研究の背景・意義

（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、2030年まで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。そのためには水蒸気ライダーやマイクロ波放射計などの地上リモートセンシング技術を駆使して、水蒸気などをより高精度・高分解能で把握することが必要である(副課題2,3)。

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ー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)。

それらの実現のためには雲・エアロゾル・火山灰等のライダーを用いた正確な観測と、雲降水による散乱や、陸面・積雪面等の大気地表面の影響を精密かつ高度に計算する放射計算技術及び、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1)。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1)。

(上記のために本研究が必要な学術的背景)

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

豪雨を構成する積雲対流は非線形・非ガウスな現象であり、線形・ガウスを仮定する4次元変分法やアンサンブルカルマンフィルタには限界がある。非線形・非ガウスな特徴を持つシビアな現象に適用できる新たな同化手法の開発が必要である。また、多くの高密度・高頻度なデータが容易に入手できる時代を迎え、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2,3)。

可視から赤外、マイクロ波にいたる波長での衛星観測に応じた大気地表面からの放射伝達計算や、そこに含まれる雲・エアロゾル等の大気粒子による光散乱特性や大気吸収特性のモデル化は、衛星による気象リモートセンシングの基盤的技術であり、世界の気象関係機関・研究所が開発の必要性や重要性を認識している課題である。またその技術はひまわりプロダクト開発に限らず、高精度衛星シミュレータとしての応用や観測チャンネルの校正、ひまわり後継機の観測データの高度利用など、幅広い学術的利用が期待される(副課題1,2)。

エアロゾルの放射強制力の正確な把握は、気候変動の監視・予測等に重要であるが、多様な物質が複雑に混合するエアロゾルは、短寿命で排出源が偏っており組成毎の分布把握が難しく、放射強制力には不確実性が大きい。エアロゾルの放射強制力の不確実性を低減し、気候変動を正確に監視・予測するためには、エアロゾルの組成別の情報の正確な把握が必要とされている(副課題1)。

集中豪雨に大きく影響を及ぼす水蒸気観測について、西日本に展開しているマイクロ波放射計により詳細な水蒸気データが得られるようになった(副課題3)。ライダーについても、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3)。

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、水蒸気ライダー、マイクロ波放射計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、それらをより有効に使う同化手法の開発が望まれている(副課題2,3)。

(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) 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 衛星データ同化の高度化

- ・全天候の赤外輝度温度同化に関わる詳細かつ包括的な研究は、世界の最先端に位置しており、現業・研究コミュニティに多くに有益な知見を提供している。
- ・ひまわり後継衛星搭載ハイパースペクトル赤外サウンダや衛星搭載ドップラー風ライダー(DWL)などの観測システムシミュレーション実験(OSSE)を実施し、これらの観測の利用方法やインパクトについて詳細に調査した。このような詳細かつ大規模なOSSEの実施は日本では初めてであり、気象庁・JAXAや世界の衛星コミュニティにおける衛星観測網検討に重要な材料を提供した。特に後継衛星搭載ハイパースペクトル赤外サウンダのOSSEでは、D2課題や本庁と連携して実行し、数値予報精度改善に大きな寄与があることを示した結果、後継衛星搭載サウンダ決定のための重要な判断材料となった。
- ・全球現業システムを用いた静止衛星搭載のCO₂バンドの晴天放射輝度温度データ同化について、詳細な効果を調査し、本庁現業システムでの利用に向けて知見およびソースコード等を数値予報課に共有した。
- ・マイクロ波輝度温度同化における陸域高度利用を行うため、マイクロ波気温サウンダに対して陸面射出率の動的推定手法(DE)を開発し本庁現業開発システムに移植し、インパクトを本庁現業開発システムを用いて詳細に調査している。
- ・ハイパーサウンダの多チャンネル情報を有効に活用するため、主成分分析を用いたチャンネル選択や再構築輝度温度同化手法を開発した。
- ・マイクロ波高周波水蒸気チャンネルの数値予報インパクト調査は、JAXAにおけるAMSR3の周波数仕様決定に貢献した。

② 全球データ同化システムの高度化

- ・誤差共分散行列全体を客観推定して同化に用いることで、解析、予報精度や理論的整合性が大幅に向上することを示した。現業化のためにソースコードや解析ツール等を数値予報課に共有した。
- ・アンサンブル生成と決定論的解析を1つの4次元変分法同化システムで行うシステムを構築し、解析、予報精度や理論的整合性が大幅に向上することを示した。現業化のためにソースコードや解析ツール等を数値予報課に共有した。
- ・同化システム全体の随伴演算により、個々の観測データの予報へのインパクトを評価するシステムを構築し、観測インパクトの性質や同化システムの課題について

て示した。現業化のためにソースコードや解析ツール等を数値予報課に共有した。

- ・水物質の情報をもった観測の高度利用のために、マイクロ波輝度温度観測の誤差共分散行列構造の流れ依存性を扱えるようにデータ同化システムを拡張し、予報精度が改善することを示した。
- ・海面水温や地表面温度等を4次元変分法で解析するシステムを構築し、熱帯を中心に解析、予報精度が向上すること、従来利用が難しかった低周波マイクロ波衛星観測についても効果的に同化できることを示した。
- ・4次元変分法をいくつかの方法で拡張してより多くの情報を同化することで、解析精度が大幅に向上することを示した。OSSEの真値場として利用した。
- ・大気海洋結合同化システムへの拡張を行い、大気海洋結合同化研究に貢献した。

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衛星群によるエアロゾル組成の推定手法は、JAXAのプロダクトとしてWEBサイトで公開された。また、EarthCARE衛星のJAXAプロダクトになることが決定している。
- ・スカイラジオメータのエアロゾル推定手法は、International SKYNETデータセンターに採用され、プロダクトが公開された。また、気象庁大気海洋部環境・海洋気象課の現業解析にも採用された。
- ・気象庁や大学等の各種研究機関の日射計、スカイラジオメータ、ライダー等のデータから数十年規模のエアロゾルの変動を導出し、MRI-ESM2のエアロゾルの再現性を検証した。
- ・雲の観測を目的に開発した全天カメラは、他研究機関（環境研、東北大学）で導入された。また、そのカメラを用いて気象庁大気海洋部観測整備計画課と羽田空港において無人観測の実証実験を実施することとなった。
- ・開発を行ってきた各種衛星観測に対応した高速・高精度な大気放射計算手法や高度な雲・エアロゾルモデルを用いた粒子散乱特性データセットを利用することで、次期ひまわりや気象衛星サウンダ利用技術の開発に貢献できる。
- ・赤外サウンダ、ひまわり観測データを用いた複合的火山灰推定アルゴリズム(OVAA)の開発。火山2研との共同によるJMA-ATMへの同化試験の実施。
- ・地上放射観測網において、分光放射計が2020年8月上旬に西之島からの火山噴煙由来のエアロゾルを捉え、解析した結果を論文で発表した。
- ・南極観測では、月光観測可能な分光放射計の導入計画が進み、分光放射計の整備と南極昭和基地での観測が開始した。

(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・非ガウス性が卓越する顕著現象に対する予測可能性の向上

- ・流れに依存した背景誤差を用いたデータ同化
- ・気候学的背景誤差と流れに依存した背景誤差を併用するハイブリッドデータ同化のソースコードを提供した。令和4年3月から気象庁局地解析で現業利用されている。

② 高度な観測データ同化手法の開発

- ・気象庁メソ数值予報システムを用いて船舶搭載型 GNSS 可降水量同化のインパクトを実証した。その結果、現業システムにおける船舶搭載型 GNSS 観測データの利用につながった。
- ・D1 課題や本庁と連携して後継衛星搭載ハイパースペクトル赤外サウンダのメソの OSSE を実行し、豪雨予測の改善に大きな寄与があることを示した。この結果は後継衛星検討のための重要な判断材料となった。

③ アンサンブルシステムによる豪雨予測

- ・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) 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

- ・梅雨期に九州で水蒸気ライダーの連続観測を実施し、2020 年 6 月 25 日の長崎県周辺や 2021 年 7 月 10 日の鹿児島県北西部で発生した線状降水帯では、発生直前に大気下層の水蒸気量が増加していたことを初めて観測することに成功した。
- ・線状降水帯の発生事例について水蒸気ライダーのデータ同化実験を実施し、降水量予測にインパクトがあることを示した。
- ・太陽光の影響を受けにくく、運用コストも優位な差分吸収(DIAL)式水蒸気ライダーの開発に取り組み、技術を蓄積してきた。

② 地上マイクロ波放射計を用いた水蒸気観測データ利用技術に関する研究

- ・地上マイクロ波放射計の観測整備に関する作業や性能評価のための輝度温度計算。1DVAR 計算コードの開発。

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

- ・過去 40 年間の長期にわたって成層圏エアロゾル観測を行い、アジアでは唯一の長期観測地点として国際的にも評価されおり、観測データは世界の研究機関で利用されている。

2. 研究の目的

(全体)

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

(副課題 1) 衛星データ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「主に全球大気数值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。

(副課題2) 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

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。

(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。

3. 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 (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, 3)

(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。

② 全球データ同化システムの改良

- ・アンサンブルを用いた全球データ同化手法の開発・改良や、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。

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、エーロゾル組成推定技術を利用し、エー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のため、衛星搭載の赤外サウンダデータにおける観測データ情報圧縮・抽出アルゴリズムを開発する。
- ・衛星リモートセンシングの基盤技術の高度化を目的に、雲水・氷晶・雪片・霰の放射特性の高精度化、可視・赤外・マイクロ波の放射伝達計算手法や、温度・水蒸気・不安定指数の推定技術の高度化を行う。
- ・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。

（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・非ガウス性が卓越する顕著現象に対する予測可能性の向上

- ・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。

② 高度な観測データ同化手法の開発

- ・高頻度・高密度な観測データを同化する手法を開発するとともに、新規観測データの同化手法を開発する。

③ アンサンブルシステムによる豪雨予測

- ・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。

（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

- ・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水蒸気ライダー等の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。

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

- ・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。
- ・地上マイクロ波放射計を用いた水蒸気・雲の推定技術開発を行う。

③ 火山噴火や森林火災等エー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

- ・全球規模で気候変動に影響を及ぼす成層圏エー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。

4. 研究体制

研究代表者：石元裕史

担当研究者：

- (副課題1) サブ代表者： 担当研究者：7名程度
- (副課題2) サブ代表者： 担当研究者：11名程度
- (副課題3) サブ代表者： 担当研究者：5名程度

研究協力者：

データ同化手法の開発等のため情報基盤部数値予報課や気象大学校から、マイクロ波放射計観測網の維持やマイクロ波放射計の高度利用のため大気海洋部観測整備計画課と大気海洋部業務課気象技術開発室から、GNSS 現業運用のため大気海洋部環境・海洋気象課から、気象観測研究部へ併任いただく。

また、衛星によるエアロゾル・雲・気象要素の観測技術の高度化やひまわりの放射計の高度利用のため、データ同化と観測で他の高度利用のため、大学等研究機関の研究者を含む客員の方にもご協力いただく。

5. 研究計画・方法

(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 衛星データ同化の高度化

- ・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、リトリーブに取り組む。
- ・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・台風ボ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) のエア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ア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、昼夜間のエア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アロゾルの組成推定、エアロゾル光学特性の空間・時間分布を解析する
- 赤外サウンダー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。

② 高度な観測データ同化手法の開発

- メソ解析における赤外サウンダーデータ、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。

③ アンサンブルシステムによる豪雨予測

- ・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。

(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

- ・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。

② 地上マイクロ波放射計を用いた水蒸気観測データ利用技術に関する研究

- ・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。

① 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

- ・EarthCARE 衛星 (2024年打ち上げ)、AOS 衛星プロジェクト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。

6. 研究年次計画 (研究フロー図を添付)

(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

<中間評価時の到達目標>

① 衛星データ同化の改良

- ・ひまわりイメージャで開発した全天候赤外輝度温度同化処理を、サウンダ等に応用し有効性を調査する。全球同化システムで開発したDWL同化を、メソ同化に適用し有効性を調査する。陸域マイクロ波輝度温度同化は現業化に道筋をつける。極軌道衛星搭載ハイパーサウンダの多チャンネル情報活用のため、新しいチャンネル選択等の手法の効果を詳細に調査する。小型衛星や衛星搭載レーダー

の特性調査や同化可能性調査を行い、初期的な結果を得る。サウンドと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改良

- ・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、粒子近似等による高次誤差統計モーメント導入、水物質の制御、水物質導入等の観測演算子高度化、アンサンブルによる地球表面と大気の結合同化、モデル誤差を考慮した同化手法の開発を進め、精度等を評価する。
- ・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、水物質関連観測同化の拡充、結合同化による境界（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・台風ボーガスなどのリトリーブ量から直接同化への高度化を進め、精度等を評価する。
- ・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。複数の OSSE 手法を調査し、より堅牢な実験手法の構築を進める。OSSE により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

- ・EarthCARE 衛星を用いたエアロゾルの推定手法を開発し、全球のエアロゾルの変動を解析する。また、現行静止気象衛星を用いたエアロゾルの推定手法を開発し、日本周辺の高解像度のエアロゾルの変動を解析する。
- ・各種全天カメラを用いて、雲の三次元分布と光学特性を観測する手法を開発する。
- ・AI を応用した衛星データ情報抽出技術を開発し、性能を評価する。
- ・太陽光・月光観測分光放射観測技術の開発を進め、昼夜間のエアロゾル光学特性の連続観測を実施する。
- ・分光放射計の地上観測データにおいて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。
- ・積雪粒子を対象とした不純物混合氷粒子の光散乱特性計算手法を完成させ、不純物濃度に対応した可視-近赤外波長での粒子散乱特性データベースを作成する。
- ・赤外サウンドデータとひまわり/GCOM-C データを用いた複合的な OVAA 火山灰推定アルゴリズムとひまわり VOLCAT との比較や、火山灰高度推定結果と衛星ライダー観測との比較、火山 2 研と共同で JMA-ATM への同化事例を増やし、物理量推定精度の定量的な評価を行う。

（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 ＜中間評価時の到達目標＞

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

- ・メソ解析に対して、流れ依存性や非ガウス性を考慮するスキームを組み込み、性能を評価する。
- ・水物質に関わる背景誤差の評価手法を開発し、その手法が雲・降水に関する観測の同化に与えるインパクトを調査する。
- ・非ガウス性の高い観測データについて、その同化手法を開発し、一部についてはメソ解析による性能評価を行う。

② 高度な観測データ同化手法の開発

- ・GPM/DPR、静止衛星赤外イメージャおよびサウンダ、GNSS-RO、マイクロ波など衛星データの新規同化手法開発および高度化を図り、一部については現業化に向けた取り組みを行う。
 - ・地上設置型マイクロ波放射計データや二重偏波レーダー、台風ボーガスデータなどの観測データについて、同化手法の開発を行い、一部については現業化に向けた取り組みを行う。
 - ・極端事象を捉えている観測データについてその同化手法を開発し、メソ解析による性能評価を実施する。
- ③ アンサンブルシステムによる豪雨予測
- ・メソ解析と親和性の高いアンサンブル予測システム（EnVar、LETKF など）を新規開発し、初期的な性能評価を実施する。
 - ・アンサンブルシミュレーションデータの高度利用として、災害に関する確率予測情報を作成する。

（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

＜中間評価時の到達目標＞

- 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
- ・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品質の評価と品質管理方法の開発を行い、実況把握への利用を試行する。
 - ・湿潤な下層インフローの水蒸気構造を観測から明らかにし、豪雨との関連を示す。
 - ・ライダーで観測される雲底高度と雲底付近の水蒸気量、マイクロ放射計で観測される鉛直積算雲水量や可降水量などの相関関係の解析を行い、雲の維持に水蒸気を与える影響を評価する。
- ② 地上マイクロ波放射計を用いた水蒸気観測データ利用技術に関する研究
- ・引き続き、地上マイクロ波放射計観測網で得られた観測輝度温度や放射計算から求められる可降水量などを線状降水帯データベースに提供する。
 - ・地上マイクロ波放射計の可降水量や放射計算で推定する雲水量・水蒸気プロファイルの推定技術の高度化を行う。また地上マイクロ波放射計と他の地上測器観測や衛星観測データを複合的に用いた水蒸気・気温プロファイル推定を行い、ゾンデプロファイルとの比較などからその有効性を調べる。
- 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
- ・地上ライダーによる成層圏エアロゾル、火山灰等の観測を行い、地球システムモデル検証のためのデータセットを作成する。
 - ・地上ライダー観測データを用いた対流圏エアロゾル組成の鉛直分布の推定を行い、その結果を地球システムモデルの検証に利用する。
 - ・EarthCARE 衛星（2023年打ち上げ）搭載ライダーで観測される成層圏の後方散乱係数を地上ライダーで検証する。
 - ・AOS 衛星プロジェクト等の将来の衛星観測を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。

7. 研究の有効性（気象業務への貢献や社会貢献など）

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ー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、エー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）

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を数値予報課に提供してきた。またや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）