

研究課題	<p>(P課題) 大気の物理過程の解明と物理過程モデルの開発に関する研究 副課題1：高解像度数値モデルにおける線状降水帯等の激しい気象現象の再現性向上 副課題2：雪氷物理過程の高度化に資する観測的研究 副課題3：数値モデルの予測精度向上に向けた積雲対流・雲・放射スキームの精緻化 副課題4：実験観測に基づくエーロゾル・雲・降水微物理素過程モデリングの改良</p>
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	<p>○中里真久 気象予報研究部長 (副課題1) 〔気象予報研究部〕○橋本明弘、林修吾、水野吉規、大泉伝、松井楽徳、岸達郎、築地原匠 〔台風・災害気象研究部〕辻野智紀 (副課題2) 〔気象予報研究部〕○大河原望、谷川朋範、庭野匡思、畑中謙一郎（併任）、村田友香（併任） 〔気候・環境研究部〕豊田隆寛 (副課題3) 〔気象予報研究部〕○関山剛、長澤亮二、神代剛、川合秀明（併任） 〔全球大気海洋研究部〕吉村裕正 〔台風・災害気象研究部〕和田章義（併任） (副課題4) 〔気象予報研究部〕○折笠成宏、田尻拓也、岩田歩、橋本明弘 〔全球大気海洋研究部〕足立光司、梶野瑞王</p>
目的	<p>観測や実験により大気の種類物理過程を解明し、その物理過程モデルの高度化等を通じて、大雨等の顕著現象、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の向上に寄与する。</p> <p>(副課題1) 解像度数百 m 以下の数値モデルによる、顕著現象の詳細な構造分析に基づく機構解明・再現性の向上、及び、雲・乱流過程の高度化を通じて、線状降水帯をはじめとする激しい気象現象の予測精度向上に貢献する。</p> <p>(副課題2) 観測に基づき雪氷物理過程の理解の深化とその物理モデルの高度化を図り、雪氷にかかわるモデルの精度の向上及び現業プロダクトの改善に貢献する。</p> <p>(副課題3) 将来の気象庁全球モデル（GSM）の水平高解像度化への適合や、放射収支やモデルバイアスの改善のため、短期から週間予報、季節予報や地球温暖化予測に用いられる数値予報モデルの積雲対流、部分雲、放射スキームといった物理過程を精緻化し、予測精度向上に寄与する。</p> <p>(副課題4) 室内実験や野外観測によるエーロゾル・雲特性から、エーロゾル・雲・降水の微物理素過程や相互作用を解明し、数値モデリングを精緻化することで降水や放射の予測精度向上に寄与する。</p>
目標	<p>顕著現象の再現性や予測精度の向上及び雲・降水過程や放射過程などの不確実性やモデルバイアスの低減に資するよう、各種の観測成果や実験施設、観測装置を十分に活用しつつ、素過程の解明から物理過程モデルの高度化までに取り組むことにより、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や将来に向けた課題を明らかにし、有効な改善方法を提案する。</p> <p>(副課題1) 解像度数百 m 以下の数値シミュレーション・実験・観測により、大雨、大雪、突風、線状降水帯、台風などの顕著現象から雲・乱流などの素過程にわたって、詳細な構造分析に基づく機構解明、及び、再現性向上を目指す。日本とその周辺の領域</p>

- の様々な環境下で発生する激しい気象現象について、
- ① 数値モデルによる積乱雲・降雪雲内の鉛直流や雲・降水粒子特性など詳細な内部構造を観測データと比較することで検証する。
 - ② 高解像度数値シミュレーションを活用した解像度に応じた物理過程の検討などに基づき、数値モデルの課題を抽出し、再現性向上のための方策を示す。
 - ③ 大気境界層において線状降水帯の発生や維持に特に重要な以下の乱流現象を 1. 数値計算、2. 風洞実験、3. 野外観測により明らかにする：
 - (a) 不安定成層における上昇流の発生、および地表面近傍に現れるその前兆現象
 - (b) 潜熱（水蒸気）の供給に寄与する鉛直輸送と地表面近傍の水平輸送
 - (c) 顕熱、運動量の鉛直輸送と地表面近傍の水平輸送
 - ④ 得られた知見を統合し、境界層過程の改善策を取りまとめて、乱流輸送に関する新たなスキームを構築する。風洞実験や野外観測による検証を経て、気象モデル asuca に実装し数値実験による検証を行う。
 - ⑤ 関連課題との連携により課題を抽出するとともに解決法を検討する。

(副課題 2)

- ① 地上観測に基づく雪氷物理過程の解明
雪氷物理量観測の基盤技術を開発しつつ放射・気象・積雪の地上観測を国内（札幌・北見・長岡）において実施し、観測データに基づいた雪氷物理過程の解明を進める。また、観測データを活用して、雪氷圏を対象にした放射伝達モデルの開発を行う。
- ② 雪氷に関する衛星リモートセンシングアルゴリズムの開発及びデータ利活用
地上観測データから得られた知見や、雪氷圏を対象にした放射伝達モデルを活用して衛星リモートセンシングアルゴリズムを開発・改良し、雪氷圏変動の面的な実態把握を行う。また、次期衛星を含む静止衛星ひまわりによる積雪・海氷の質的な雪氷プロダクトの充実および現業利活用の検討を行う。
- ③ 雪氷物理過程モデルの高度化
観測データの検証データとしての利用や、観測から得られた積雪・海氷に関する物理過程の知見を活用することにより、これまで開発を行ってきた積雪変質モデルや海氷モデルの高度化を図る。特に世界的に見てもアルベド再現の不確実性に係る課題となっている積雪変質モデルにおける光吸収性不純物の積雪時空間変動への影響考慮、及び、海氷モデルにおける融解期のメルトポンドの影響考慮について改善を進める。さらに、積雪変質モデルの現業予測情報への高度利用を進めるとともに、海氷モデルの海洋モデルへの組み込みを行う。

(副課題 3)

- ① 積雲対流スキームの精緻化
将来の気象庁全球モデル（GSM）の水平高解像度化や気象庁メソモデル（MSM）による顕著現象などの予測精度向上に向け、対応する格子間隔に適合が必要となる積雲対流スキームなどの物理過程の問題点を抽出し、改善のための方策を示す。
- ② 雲・放射スキームの精緻化
長期の予測やデータ同化において重要となる放射収支やモデルバイアスの改善に向け、関連する雲・放射スキームといった物理過程の問題点を抽出し、改善のための方策を示す。

(副課題 4)

- ① 世界的にみて未解明かつ雲生成にインパクトが大きいエアロゾル粒子を対象とした室内実験や多様な地点での野外観測によるエアロゾル物理・化学分析データから、エアロゾルタイプ別の雲核（CCN）・氷晶核（INP）の特性を解明し、定式化を図る。
- ② 実大気で見られるエアロゾル粒子の混合・変質過程に基づき、野外観測と室内実験との比較、ボックスモデル数値実験との比較検証から雲粒・氷晶発生過程に関する雲物理パラメタリゼーション改良を行い、雲生成過程の解明を進める。
- ③ 室内実験や野外観測の結果を基に、詳細微物理モデルによる数値実験との比較

	<p>検証を行い、CCN・INP 特性、エアロゾル粒子の混合・変質過程を含めた詳細微物理モデルの改良を図る。</p> <p>④ 詳細微物理モデルを導入した3次元改良モデルによる数値実験を大気汚染によるインパクトの高精度な評価等を観点に実施し、エアロゾル・雲・降水モデリングの精緻化を進める。</p>
<p>研究の概要</p>	<p>(副課題1)</p> <p>解像度数百 m 以下の数値シミュレーション・実験・観測により、日本とその周辺の領域での様々な激しい気象現象(大雨、大雪、突風、線状降水帯、台風など)及び雲・乱流等について、それらの再現性やモデリングに関する課題の抽出、改良のための方策の検討を行う。</p> <p>① 観測データに基づくモデルの検証・改良</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 高頻度高密度観測データを用いた時間・空間解像度の高い検証により、モデルの解像度に応じた再現性を把握し課題を抽出する。 ・ モデルの物理過程に関する情報を抽出するための、多様な観測データを用いた多角的な検証法を検討する。 ・ 着目する現象の発生しやすい局地環境の国外地域を対象とする数値実験を適宜実施し知見を活用する。 <p>② 解像度に応じた物理過程の検討</p> <p>Large Eddy Simulation (LES 実験) をリファレンスとし、解像度に応じた適切な物理過程パラメタリゼーションスキームの検討を行う。それぞれの解像度における乱流輸送等の挙動を把握し、グリッドスケール、サブグリッドスケールで表現されるべき微視的過程を検討する。</p> <p>③-1 数値計算による境界層乱流の解析</p> <p>高解像度の Large Eddy Simulation や Direct Numerical Simulation を用いて境界層乱流の数値計算を行い、データを解析する。特に対流の発生については、発生時の場の特徴をコンポジット解析(条件付き平均)などにより抽出して調べ、対流現象と境界層下層に現れるその前兆現象の調査を行い、線状降水帯予測の改善の可能性と方向性を見出す。</p> <p>③-2 風洞実験による境界層乱流の解析</p> <p>気象研風洞で各種風速計・温度計・濃度計を用いて境界層乱流の実験を行い、データを解析する。機能強化した風洞装置を用いて、安定、不安定領域における境界層乱流の実験を行い、乱流輸送についての解析を前研究計画から引き続いて行う。また、粒子画像流速測定法(PIV)により得られる風速の面的情報を活用し、③-1と同様に境界層下層における対流の前兆現象の調査を行い、線状降水帯予測の改善の可能性と方向性を見出す。さらに、各種境界層乱流におけるガス拡散実験により、鉛直分布や床面粗度への依存性などを調査し、潜熱の乱流輸送モデルの高度化の方向性を見出す。</p> <p>③-3 野外観測による境界層乱流の解析</p> <p>気象研露場において蒸発散測定装置・超音波風速温度計・赤外線濃度計等を用いて通年連続観測を行い、各種地表面フラックスのデータを蓄積・解析する。観測データやそれらの解析の結果は③-2風洞実験に対する現実大気のリファレンスとして用いる。③-2風洞実験に対応して乱流輸送の解析を行い、スキームの高度化の方向性を見出す。</p> <p>④ 乱流輸送スキームの検討・構築と気象モデルへの実装・検証</p> <p>③-1～3から得られた知見とも統合し乱流輸送スキームの検討と構築を行い、気象モデル asuca に実装・検証を行う。なお③-1～3のそれぞれにおいて必要に応じて技術開発や事例研究を行う。</p> <p>⑤ 関連課題との連携による課題抽出・解決法の検討</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 大気モデルの表現する降水粒子特性が雪氷物理過程モデルにもたらす効果を調査し、高度化の方策を検討する。 ・ 積雲対流スキームの開発に活かすために、LES 実験の結果や解像度依存性に関する知見を副課題3と共有する。 ・ 整備した数値モデルによる予測の検証ツールや実験環境を関連課題と共有することで、効率的な研究を推進する。

(副課題 2)

① 地上観測に基づく雪氷物理過程の解明

雪氷物理量観測の基盤技術を開発しつつ放射・気象・積雪の地上観測を国内（札幌・北見・長岡）において実施し、観測データに基づいた雪氷物理過程の解明を進める。また、観測データを活用して、雪氷圏に特化した放射伝達モデルの開発を行う。

② 雪氷に関する衛星リモートセンシングアルゴリズムの開発及びデータ利活用

地上観測データから得られた知見や、雪氷圏に特化した放射伝達モデルを活用して衛星リモートセンシングアルゴリズムを開発・改良し、静止気象衛星ひまわりや極軌道衛星データに適用することにより、雪氷圏変動の面的な実態把握を行う。また、次期衛星を含む静止衛星ひまわりによる積雪・海氷の質的な雪氷プロダクトの充実および現業利活用の検討を行う。

③ 雪氷物理過程モデルの高度化

観測データの検証データとしての利用や、観測から得られた積雪・海氷に関する物理過程の知見を活用することにより、これまで開発を行ってきた積雪変質モデルや海氷モデルにおけるアルベド不確実性低減等の高度化を図る。さらに、積雪変質モデルの現業予測情報への高度利用を進めるとともに、海氷モデルの海洋モデルへの組み込みを行う。

(副課題 3)

将来の気象庁全球モデルの水平高解像度化への適合や、放射収支やモデルバイアスの改善のため、関連するモデルの物理過程について、理想実験から現業と同様のシステムによる実験まで段階を踏み、各種観測データによる検証、他のモデルや解析値との比較による評価を行い、課題の抽出及び改良のための方策の検討を行う。他の副課題と連携し、新しく開発された物理過程の全球モデルへの導入や性能評価に向けた情報提供や、新しい物理過程を組み合わせた実験等を行う。またデータ同化、地球システムモデルに関する研究課題と連携し、データ同化技術や長期積分に基づく検証結果を参照する一方、本副課題による物理過程の高度化の成果を提供し観測データの有効利用や予測精度向上に寄与する。本庁への成果の提供に向けては他の物理過程改良との組み合わせを想定した開発・情報交換を行う。

① 積雲対流スキームの精緻化

- ・ 水平高解像度化への適合が必要な物理過程を抽出し、対応策を取りまとめる。
- ・ 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開発し、台風や積雲の組織化の検証及び予測精度の評価を行う。特に、クロージャ部分や積雲モデルのグレーゾーン対応を検討する。副課題 1 による LES 実験に基づくリファレンスや、解像度に応じてパラメタライズすべき現象に関する知見の提供を受け、開発に活用する。

② 雲・放射スキームの精緻化

- ・ 地球システムモデル (MRI-ESM3) や気象庁全球モデル (GSM) において、様々な種類の雲をより精緻に表現するための改良を行う。
- ・ 観測データ・リファレンスとの比較や文献調査に基づき、放射スキームの問題点を抽出し、改善のための開発を行う。
- ・ 現状扱っていない長波放射における雲の散乱効果についての調査と開発を行い、長波放射フラックス・加熱率・計算コストへの影響や予測精度の評価を行う。

(副課題 4)

① 雲核・氷晶核の特性解明と定式化

雲生成チェンバー、地上モニタリング観測システム、電子顕微鏡等を用いた室内実験や野外観測の手法等についてより良い方法を検討する。この結果を踏まえて、土壌粒子やバイオエアロゾル等のタイプ別エアロゾル粒子を対象に CCN・INP 特性および雲生成に関する室内実験を行う。また、多様な地点でのエアロゾル・雲の野外観測やサンプリングを行う。これらのエアロゾル物理・化学分析データから、エアロゾルタイプ別の CCN・INP 特性の定式化改良を行う。

② 雲物理パラメタリゼーションの改良

実大気エアロゾルを模した粒子の発生方法、混合方法を検討するとともに、それ

	<p>に適した実験環境を整備する。人為的に発生させた混合粒子や変質させた粒子を対象に、高温高湿で強い上昇流範囲までカバーした雲生成チェンバー等を用いた雲生成に関する室内実験を行う。また、CCN・INP 特性に関する室内実験および個別粒子分析等も併せて、エアロゾルの混合・変質過程と雲生成との関連を調査する。実大気での雲生成過程の解明を図るため、それらの室内実験結果とボックスモデルによる数値実験結果との比較検証から、雲粒・氷晶発生過程に関する雲物理パラメタリゼーション改良を行う。</p> <p>③ 詳細微物理モデルの改良 CCN・INP 特性を評価できる詳細微物理モデルを用いて、雲生成にインパクトが大きいエアロゾルタイプ別の数値実験、エアロゾル粒子の混合・変質過程を対象とした数値実験を行う。それらの結果と、室内実験や野外観測による結果との比較検証を進め、他の研究課題と連携しながら詳細微物理モデルの改良を行う。</p> <p>④ エアロゾル・雲・降水モデリングの精緻化 現在の雲スキームの改良を検討し、問題点を整理する。詳細微物理モデルが実装された3次元改良モデルによる数値実験を行い、最新のパラメタリゼーションを導入した雲スキームの改良を進める。エアロゾル-雲-放射の相互作用の解明を図るため、大気汚染によるインパクトの高精度な評価等を観点に数値実験を実施し、他の研究課題と連携しながら、エアロゾル・雲・降水モデリングの精緻化を進める。併せて、3次元改良モデルと現行バルク法との比較検証から現行バルク法のパラメタリゼーション改良を行う。</p>
研究の有効性	<p>(気象業務への貢献)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・領域モデルに用いるスキーム等の改良により、線状降水帯などの顕著現象の予測精度の向上に資する。ひいては、防災気象情報の高度化、気象災害の軽減に貢献する。 ・全球モデル・地球システムモデルに用いるスキーム等の改良により、気候予測の不確実性の低減や温暖化予測情報の精度向上、台風の予測精度向上に資する。 ・精度よい気象データを提供することにより、気象ビジネス分野への貢献に資する。 ・スキーム等の開発において得られた技術や知見は、本庁におけるモデル開発業務にも活用される。 ・副課題別の波及効果として、以下が期待される。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 整備した数値モデルによる予測の検証ツールや実験環境を関連課題と共有することで、効率的な研究を推進する。(副課題1) ➢ 積雪変質モデルの高度化を通じた予報業務の雪に関する情報(解析積雪深・降雪量等)の精度向上や現業予報情報の精度向上、海氷モデルの高度化を通じた海洋モデルの精度向上への寄与。(副課題2) ➢ エアロゾル等も考慮した視程予測の可能性検討とその精度向上への寄与。(副課題4) <p>(学術的貢献、社会的貢献など)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・数値予報モデルの改良により、第一推定値のバイアスの軽減を通じた、データ同化システムにおける観測データの有効利用と解析精度向上に資する。 ・顕著現象の詳細な内部構造の検証や、地表面近傍の乱流の理解などにより、線状降水帯をはじめとする顕著大気現象の発生・維持機構の解明に資する。 ・大気物理過程の多面的な解明を進めることにより、大気中の物理プロセスの理解の深化に資する。
令和8年度実施計画	<p>(副課題1)</p> <p>① 観測データに基づくモデルの検証・改良 数100m以下～数km格子の数値実験を行うとともに、各種観測データを用いて、モデル解像度に応じた再現性を評価する。高解像度数値実験により、日本とその周辺の領域での様々な激しい気象現象の内部構造および雲・乱流過程の解明に取り組むとともに、再現性向上に向け、解像度別の課題を整理し、改善策の検討を行う。</p> <p>② 解像度に応じた物理過程の検討 LES実験の結果をもとに、数100m以下～数km格子の数値実験において、グリッドスケール、サブグリッドスケールで表現されるべき微視的過程を検討しつつ、物理過程の改良を進める。</p> <p>③-1 数値計算による境界層乱流の解析</p>

高解像度の Large Eddy Simulation や Direct Numerical Simulation による境界層乱流の数値計算を実施、その結果を用いて乱流輸送の解析を行う。また、不安定時の対流現象の発生機構の分析を行い、予測方法の検討と構築を進める。

③-2 風洞実験による境界層乱流の解析

気象研風洞で中立、安定、不安定領域における境界層乱流の実験を実施し、データを蓄積する。また、③-1 と同様に境界層下層における不安定時の対流現象の発生機構の分析及び予測方法の検討と構築を進める。④において構築を進めるモデルのアプリオリテストのためのデータの整理と提供を行う。

③-3 野外観測による境界層乱流の解析

気象研露場において通年連続観測を行い、各種地表面フラックスのデータを蓄積、③-2 風洞実験に対する現実大気のリファレンスとして乱流輸送の解析に用いる。④において構築を進めるモデルのアプリオリテストのためのデータの整理と提供を行う。

④ 乱流輸送スキームの検討・構築と気象モデルへの実装・検証

③-1 ~ 3 から得られた知見とも統合し構築された乱流輸送スキームに対して③-2、3 のデータを用いたアプリオリテストを実施、気象モデル asuca への実装と検証を行い、問題点を抽出し必要に応じてスキームの改善を進める。なお③-1 ~ 3 のそれぞれにおいて必要に応じて技術開発や事例研究を行う。

⑤ 関連課題との連携による課題抽出・解決法の検討

- ・気象モデルの降水粒子特性が雪氷物理過程モデルにもたらす効果を調査し、高度化の方策を検討する。
- ・LES 実験の結果や解像度依存性に関する知見を副課題 3 と共有する。
- ・検証ツールや実験環境を関連課題と共有することで、効率的な研究を推進する。

(副課題 2)

① 地上観測に基づく雪氷物理過程の解明

札幌・北見・長岡において現地観測に必要な観測装置・分析装置の開発・改良を行いつつ、放射・気象・積雪観測を実施し、雪氷物理過程の理解に必要な基盤データを取得する。取得した観測データを利用して、雪氷圏に特化した放射伝達モデルの開発を行うとともに、主に積雪・海氷を対象とした物理過程の解明を進める。

② 雪氷に関する衛星リモートセンシングアルゴリズムの開発及びデータ利活用

①で得られたデータや知見を活用してリモートセンシングアルゴリズムを改良し、多バンドで時空間分解能の優れたひまわり、長期観測中の MODIS を搭載する Tera/Aqua や SGLI を搭載する GCOM-C (いずれも極軌道衛星)、マイクロ波衛星等の多様な衛星を利用して雪氷の広域・長期データセットを作成し、主に極域、日本周辺における面的な雪氷物理量の把握・監視を行う。

③ 雪氷物理過程モデルの高度化

①で得られた知見および①②で得られたデータを活用して積雪不純物(光吸収性エアロゾル)を考慮した積雪変質モデルや海氷モデルの改良を進める。改良した積雪変質モデルや海氷モデルを、それぞれ大気モデルや海洋モデルと結合し、検証・改良を行う。この開発では、副課題 1 を含む大気モデル開発に関係する研究課題や海洋モデルに関係する研究課題と連携しながら進める。

(副課題 3)

① 積雲対流スキームの精緻化

- ・積雲対流パラメタリゼーションの水平高解像度化について、文献調査済みの当初計画案(グレーゾーン対応の新規方程式開発)を一旦留保し、人工知能/機械学習によるデータ駆動型モデルを利用した高解像度化手法の開発に着手する。
- ・観測や湿潤 LES による参照値の収集・作成を行う。

② 雲・放射スキームの精緻化

- ・全球モデルにおいて、様々な種類の雲の再現性の向上のための雲過程の精緻化、及び見直しを行う。
- ・衛星データ等の観測データによる検証を行い、CMIP や CFMIP などの枠組みで行われるモデル間比較に参加する。
- ・放射スキームの問題点を抽出するため、鉛直 1 次元モデルを用いた観測データ・

リファレンスとの比較や文献調査を行う。

(副課題 4)

- ① 他副課題や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、地上モニタリングシステム・電子顕微鏡分析等を用いて、雲生成に重要にもかかわらず説明が進んでいないエアロゾルタイプ (バイオ、土壌など) を主な対象とした室内実験を引き続き行う。エアロゾルタイプ別の CCN・INP 特性に関するデータを取得し、その特性の定式化を進める。
- ② 実大気エアロゾルを模して発生させた混合粒子や変質させた粒子を対象に、高温高湿で強い上昇流範囲までカバーする実験環境下で、雲生成チェンバー等を用いた本実験を引き続き行う。その実験結果とボックスモデルによる数値実験との比較検証、雲生成のパラメタリゼーション改良を進める。
- ③ CCN・INP 特性を評価できる詳細微物理モデルを用いた数値実験と、エアロゾルタイプ別やエアロゾルの混合・変質過程を対象とした新たな室内実験結果との比較検証を基に、詳細微物理モデルの改良を進める。併せて、エアロゾル・雲・降水粒子の微物理過程の AI 高速微物理モデルの開発・検証に取り組む。
- ④ 詳細微物理モデルが実装された 3 次元改良モデルによる数値実験を大気汚染によるインパクト等を観点に実施し、他の研究課題と連携しながら、これまで得られた知見から雲スキームの改良を進める。3 次元改良モデルと現行バルク法を用いた数値実験結果の比較を基に、現行バルク法のパラメタリゼーション改良を進める。