

研究課題	(P課題) 大気の物理過程の解明とモデル化に関する研究 副課題1: 高解像度非静力学モデルによる激しい気象現象の再現性向上 副課題2: 接地境界層における乱流輸送スキームの精緻化 副課題3: 雪氷圏の監視・変動要因解明とその基盤技術の開発 副課題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 副課題5: エーロゾル・雲・降水微物理の素過程解明と微物理モデルの開発
研究期間	令和元年度から5年間(5年計画第4年度)
担当者	○高槻靖 気象予報研究部長 (副課題1) [気象予報研究部] ○藤田匡、橋本明弘、林修吾、渡邊俊一 [台風・災害気象研究部] 辻野智紀 (副課題2) [気象予報研究部] ○毛利英明、水野吉規、守永武史 (副課題3) [気象予報研究部] ○大河原望、谷川朋範、庭野匡思 [全球大気海洋研究部] 豊田隆寛 [気候・環境研究部] 保坂征宏 (副課題4) [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) [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 [応用気象研究部] 川端康弘
目的	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各種物理過程を解明し、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。 (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) エー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。
目標	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。また、他副課題で得られた物理過程改良の成果を現業数値予報モデルを用いて総合的に確認し、予報精度向上にかかる改善の提案を目指す。 (副課題 2) 接地境界層における運動量・熱などの乱流輸送の特性を①数値計算②風洞実験③野外観測から明らかにする。得られた知見を総合的に検討して気象庁領域モデル(asuca)に接地境界層過程として実装する乱流輸送スキームを精緻化し、副課題 1 と連携して、数値予報におけるインパクトを確認する。 (副課題 3) 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して、予測精度を向上させる。 (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を明らかにする。また、雲生成チェンバー等の装置を用いた実験、各種大気エアロゾルのモニタリング観測、新たに開発する詳細微物理モデルによる数値実験の結果を用いて、CCN 能、IN 能の定量的なモデル化を進める。さらに航空機観測データ等も用いて、雲・降水プロセス全般について検討を行い、3 次元モデル用の新たな雲物理モデリングの提案を行なって、降水や放射予測精度向上に向けた改善点を明らかにする。
研究の概要	(副課題 1) ①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) による予測精度のモデル解像度依存性を系統的な実験によって明らかにする。 ②副課題 2 ～ 5 の各種物理過程研究の成果を反映させた高解像度モデルを開発し、その性能を評価する。 ③②のモデルにより激しい気象現象 (局地的大雨や短時間強雨、大雪、雷雨、風のシア、突風など) の再現性の検証及び予測精度の評価を行う。 ④広領域の高解像度モデルを用いてフィリピン域における上陸台風とそれに伴う降雨の予測実験を行い、その精度を検証する。 ⑤広領域の高解像度モデルを用いて北西太平洋海域における台風・モンスーンに伴う降水や風分布の予測及びその精度を検証する。 副課題 2 ～ 5 の各種物理過程研究や、「データ同化技術の高度化と観測データの高度利用に関する研究」と密接に関連して研究を行う。また、モデル開発により得られた成果を「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」に共有することによって台風予報の改善にも貢献する。「地球温暖化と異常気象の解明と予測及び地球環境に関する研究」における地域気候モデル開発と情報交換する。 (副課題 2) ・接地境界層における運動量や熱などの乱流輸送の特性を明らかにするため①数値計算②風洞実験③野外観測を以下のように行う：

- ①LES や Direct Numerical Simulation (DNS) を用いて安定度等の条件を変えて境界層乱流の数値計算を行い、データを蓄積して詳細な解析を行う(第1～第3年度)。
 - ②気象研風洞において安定度や表面粗度等の条件を広範囲で変えて境界層乱流の実験を行い、データを蓄積して解析する(第1～第5年度)。
 - ③気象研露場において蒸発散測定装置や超音波風速温度計等を用いて地中も含む総合観測を毎年連続で行い、データを蓄積して解析する(第1～第5年度)。
 - ・データの解析は接地境界層の普遍則・粗度など境界条件の影響・既存の輸送量評価法の精度等に注目して行うものとする。とくに②風洞実験と③野外観測については、研究期間を通して系統的にデータを蓄積しつつ、各年度に着眼点を定めて解析を進める。なお必要に応じて計算・実験・観測技術の開発を行う。
 - ・得られた知見を統合して asuca に実装可能な乱流輸送スキーム改善について検討する。とくに数値計算については①asuca に改善した乱流輸送スキームを実装して検証を行う(第4～第5年度)。
- 検討に際しては数値予報課と協議を行い、必要に応じて②風洞実験や③野外観測で取得したデータを検討用に提供する。
- ①数値計算は課題「シームレスな気象予報・予測の災害・交通・産業への応用に関する研究」の副課題「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」と連携する。
 - ②風洞実験については各年度に所内全体に利用予定を照会する。
 - ③野外観測で得られた観測データは副課題3および課題「データ同化技術の高度化と観測データの高度利用に関する研究」の副課題「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」にも提供する。

(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・積雪観測を継続し、変動の実態把握、分析のための解析を進める。そうした現地観測と同期させながら、必要な観測装置・分析装置を開発・導入・改良し、主に積雪・海水を対象として、それぞれの物理過程の解明を進める。
- ②リモートセンシングによる雪氷物理量の監視、アルゴリズム開発・改良
①で得られた知見を活かしてリモートセンシングアルゴリズムを改良し、多バンドで時空間分解能の優れたひまわり、長期観測中の MODIS を搭載する Tera/Aqua や SGLI を搭載する GCOM-C (いずれも極軌道衛星)、マイクロ波衛星等の多様な衛星のデータを利用して、主に極域、日本周辺における雪氷物理量の空間変動を20年以上にわたる、量的ならびに質的な監視を行う。
- ③雪氷物理過程モデルの高度化と活用
①で得られた知見、①②で得られた検証データを活かして積雪不純物(光吸収性エアロゾル)を考慮した雪氷放射過程、積雪変質過程等を含む、積雪変質アルベドモデル SMAP や海水モデルの改良を行う。簡易版の開発も進める。これらを各種大気モデル・気候モデルに組み込み、変動メカニズム解明を行うとともに、予測精度を評価し、向上させる。この開発では、副課題1を含む大気モデル開発に関係する研究課題、エアロゾルに関係する研究課題と連携しながら進める。

(副課題4)

- 数値予報モデルの積雲対流、部分雲、放射などの物理過程を改良・高度化する。各種観測データによる検証、他のモデルとの比較、湿潤 LES との比較により評価を行いつつ開発を進める。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。
- ・グレーゾーンに対応した積雲対流スキームの開発：理想実験や鉛直1次元モデルによる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つつ、観測値や湿潤 LES の結果を参照値として開発を進める。
 - ・地球システムモデル向けに開発された層積雲スキームの、短期予報における評価：

	本スキーム単独の評価とともに、必要に応じて浅い対流や境界層スキームの改良と組み合わせることを検討する。 - 放射スキーム：雲が放射に及ぼす効果において大きなインパクトを持つ雲の水平非一様性の効果やより精緻な雲オーバーラップ等を放射計算で扱えるようにする。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つつ、観測データ・再解析データによる検証と参照利用を行いながら開発を進める。 (副課題 5) - 雲生成チェンバー、IN 計、CCN 計等を用いた実験により、大気中の主なエアロゾルについて、内部混合の影響も含め、CCN 活性、IN 活性を定量化する。 - エアロゾルの物理化学特性の雲生成や降水、雲の放射特性への影響を表現する微物理モデルを開発し、チャンバー実験などを再現、パラメタリゼーションの開発を行う。 - 航空機観測データや微物理モデルを活用して、雲・降水プロセス全般について 3 次元モデルに搭載可能な、詳細雲モデルを開発する。 - 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、物理化学特性の解明を行う。サンプルは外部研究機関と協力した野外観測キャンペーン等に参加することで広く採取する。得られたエアロゾル素過程の理解は、エアロゾルモデルを用いて定式化する。 - つくば及び福岡などにおいてモニタリング観測を実施し、エアロゾルや CCN, IN の変動を解明するとともに、実験的手法と組み合わせて実大気で有効な IN を特定する。
研究の有効性	- 領域モデルの改良によって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の改良によって気候予測の不確実性低減、温暖化予測向上に資する。 - 数値予報モデルの改善の波及効果として以下が期待できる。 ①第一推定値のバイアスの軽減を通じて、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 ②線状降水帯を始めとする顕著現象の発生・維持機構の解明 ③大気中の物理プロセスの理解の深化 ④雲や風の予測精度向上による再生可能エネルギー分野への貢献（特に、電力の需給バランスによる安定的な電力供給） ⑤精度よい気象データを提供することによる気象ビジネス分野への貢献 - 副課題別の波及効果は以下のとおり。 - 副課題 1：高解像度モデルは、領域気候や汚染物質・噴煙の拡散予測、高潮等の沿岸海況予測などの業務や研究への技術的基盤となる。 - 副課題 2：地上気象観測業務に対して、測器の開発や観測環境の検討さらに推計気象分布の拡充等に、本副課題から得られる技術や知見の活用が見込まれる。 - 副課題 3：気象庁の積雪防災情報の精度向上に貢献。より高精度な海水準変動予測への寄与。 - 副課題 5：視程予測の改善の可能性。
令和 4 年度 実施計画	(副課題 1) ① 水平分解能 2km～125m の NHM、asuca による梅雨期・夏季および冬季の再現実験により、異なる解像度間、モデル間の予測特性の比較、観測データによる統計検証を行い、モデルの改良点を検討する。モデル計算の最適化や、汎用性を高めるツールの整備も継続する。 ② 激しい気象現象のモデルによる再現性向上に向け、観測データとの比較、観測データによる現象機構解析、LES 実験を用いた分析を行う。雲物理過程の検証、改良、発雷と積乱雲構造の関係の分析、線状降水帯の理想化実験、対流雲の時間発展の分析、顕著現象、局地現象の再現実験などからモデルの問題点の抽出や改良に取り組む。 ③ 広領域高解像度モデルによるフィリピン上陸台風に関する研究成果を基に、熱帯や亜熱帯域での物理過程の改良を検討する。熱帯での顕著な台風事例について、水平解像度 1km 以下の asuca を用いた再現実験を実施し、台風中心付近の積乱雲群（壁

雲)、同心多重壁雲構造、最大風速および急発達再現性を、衛星観測等による検証、各物理スキームの感度実験により分析する。

(副課題 2)

- ① 前年度までに①数値計算②風洞実験③野外観測から得られた結果に基づいて乱流輸送スキームを構築し気象モデル asuca に実装する。
- 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、床表面の粗度状態との関連に着目して解析を行う。
- 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、乱流輸送と土壌水分量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・積雪観測を継続し、変動の実態把握、分析のための解析を進める。そうした現地観測と同期させながら、必要な観測装置・分析装置を開発・導入・改良し、主に積雪・海氷を対象として、それぞれの物理過程の解明を進める。また、積雪変質モデル改良のため、新たに積雪深に対する地形の影響が大きな北海道・北空知地区の 2 地点に積雪深計等を設置し、積雪深等の観測を開始する。
- ② リモートセンシングによる雪氷物理量の監視、アルゴリズム開発・改良
①で得られた知見を活かしてリモートセンシングアルゴリズムを改良し、多バンドで時空間分解能の優れたひまわり、長期観測中の MODIS を搭載する Tera/Aqua や SGLI を搭載する GCOM-C (いずれも極軌道衛星)、マイクロ波衛星等の多様な衛星のデータを利用して、主に極域、日本周辺における雪氷物理量の空間変動を 20 年以上にわたる、量的ならびに質的な監視を行う。
- ③ 雪氷物理過程モデルの高度化と活用
①で得られた知見、①②で得られた検証データを活かして積雪不純物(光吸収性エアロゾル)を考慮した雪氷放射過程、積雪変質過程等を含む、積雪変質モデル SMAP や海氷モデルの改良を行う。簡易版の開発も進める。これらを各種大気モデル・気候モデルに組み込み、変動メカニズム解明を行うとともに、予測精度を評価し、向上させる。この開発では、副課題 1 を含む大気モデル開発に関係する研究課題、エアロゾルに関係する研究課題と連携しながら進める。

(副課題 4)

- ① 積雲対流スキームの開発
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と開発を引き続き行う。またサイクル実験による評価に着手する。
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
CTE 層積雲スキームと新しく開発した浅い積雲対流スキームを導入したモデルで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。
- 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
3 次元大気モデルによる長期積分・サイクル実験を行い、従来の放射スキームとの比較による評価を行う。評価結果を参考にした開発も引き続き行う。
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 雲生成チェンバー等を用いて、代表的な内部混合粒子について CCN 特性測定実験を引き続き行い、ボックスモデルによる再現実験と比較する。 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と共に、イベントや季節変化等としてこれまで得られた解析結果を基に、実大気で有効な氷晶核・雲核に焦点を当てた分析を実施する。 ③ 過去に得られた室内実験や観測データを基に、詳細微物理モデルの検証・改良を継続する。 ④ 予報するエアロゾル情報等から CCN・IN 活性を算出する 3 次元モデルの雲スキームの開発・改良を継続する。 ⑤ 外部研究機関等と協力した野外観測・サンプリングを実施して、電子顕微鏡等を用いた分析によりエアロゾルの存在状態、物理化学特性を引き続き調査する。 ⑥ 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 を引き続き調査する。
--	---