

プロフィールシート（事前評価）

研究課題名：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ズン対応と雲・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：2019年度～2023年度（5年間）

研究代表者：小泉 耕（予報研究部長）

研究担当者：（副課題代表）山田芳則、毛利英明、保坂征宏、中川雅之、財前祐二

1. 研究の背景・意義

（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。

引き続いて同分科会では、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。

（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。

（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つくわけではないことが分かっている。これは「グレーゾーン問題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展した結果、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。

¹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

2. 研究の目的

（全体）観測や実験により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運用し、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。

3. 研究の目標

（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、積雪モデルや海水モデルの開発・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。

4. 研究体制

研究代表者：小泉 耕

担当研究者：各副課題につき、サブ代表者ほか数名を予定（全体として年 20-25 名程度）。

（副課題 1） サブ代表者： 山田芳則

（副課題 2） サブ代表者： 毛利英明

（副課題 3） サブ代表者： 保坂征宏

（副課題 4） サブ代表者： 中川雅之

（副課題 5） サブ代表者： 財前祐二

研究協力者： 併任者として本庁数値予報課や気象衛星センター等から 3 名、客員研究員として、東大大気海洋研、岡山大、名古屋大等からの 5 名程度参加を想定。

5. 研究計画・方法

（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。
- ③ ②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、風のシアー、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：

- ① LES 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、データを蓄積して解析する(第 1～第 3

年度)。

② 気象研風洞において安定度等の条件を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通年連続観測を行い、データを蓄積して解析する(第1～第5年度)。

データの解析は運動量・熱輸送等の相似則や乱流輸送に関わる空間構造の特性を明らかにするものとする。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「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」の副課題「地域的な気候変動メカニズム・・・」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・・・」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係る研究課題、エアロゾルに係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。

6. 研究年次計画（研究フロー図を参照）

中間評価時の到達目標

(副課題 1)

- ・ 局地的大雨・大雪や風を中心として、高解像度非静力学モデルの予測精度や現象の再現性に関する解像度依存性に関する知見が得られていること。必要に応じて物理過程の新しいモデルの導入を図り、その効果の評価が可能になっていること。
- ・ フィリピンやその周辺及び北太平洋を含む広い領域での高解像度領域モデルの実行が可能になっていること、及び降水の予測精度の評価に着手していること。

(副課題 2)

- ・ 接地境界層における乱流輸送の特性について見出した新たな知見に基づいて、乱

流輸送スキーム改善の方向性が明らかになっていること。

(副課題 3)

- ・ 札幌等における冬期の地上観測・試料分析が着実に実施されていること。
- ・ 上記観測・分析結果等を活かし、雪氷の物理過程の解明が進捗していること。リモートセンシングアルゴリズムや積雪・海氷モデルに対して、雪氷の物理過程に係る得られた知見の導入が図られていること。
- ・ 日本周辺および極域での領域モデル計算を実施し、地球システムモデルの結果とともにその検証が行われていること。それを踏まえたモデルの改良が図られていること。

(副課題 4)

- ・ 積雲対流スキーム：グレーゾーンに対応した積雲対流スキームの概念モデルを構築し、実装して理想環境や鉛直 1 次元モデルにより挙動を確認する実験が行われていること。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が着手されていること。
- ・ 層積雲スキーム：様々な状況でのモデルの表現が確認されていること。浅い対流や境界層スキームの改良と組み合わせる必要があるかどうかの確認が行われていること。
- ・ 放射スキーム：雲の水平非一様性の効果とより精緻な雲オーバーラップ等を実現する仕組みを構築し、放射計算に実装して理想実験を行うことで、その挙動が確認されていること。3 次元モデルでの動作確認が着手されていること。

(副課題 5)

- ・ 顕微鏡、バーチャルインパクタ等を用いて実大気で有効な IN を調査する実験手法が確立されていること。
- ・ 内部混合粒子の発生方法を確立し、CCN 能・IN 能測定実験が実施されていること。
- ・ 主な大気エアロゾル粒子の CCN 能・IN 能を高精度に表現する、詳細雲降水微物理モデルを開発し、実験結果との比較が行われていること。
- ・ 透過型電子顕微鏡、走査型電子顕微鏡、温湿度制御チャンバー付光学顕微鏡を用いた、エアロゾルの大気反応や温度湿度変化時の物理化学特性分析に関する手法が確立されていること。
- ・ エアロゾルの個別粒子解析の結果を参考にして、現実に近いエアロゾルパラメータの定式化及び妥当性確認が行われていること。様々な物理的パラメータについて従来法による計算結果との違いが明らかになっていること。

7. 研究の有効性（気象業務への貢献、学術的貢献、社会的貢献など）

- ・ 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
 - 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

- 顕著現象の発生・維持機構の解明
- 大気中の物理プロセスの理解の深化
- 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）
- 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：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