

第7部

調査・研究

第1章 技術開発と調査研究

気象庁はいわゆる技術官庁であり、科学技術による裏付けが重要な業務基盤となっている。そのため、常に最新の科学技術の成果を的確に取り入れ、観測・予報の技術開発を推進することが重要である。気象庁では、施設等機関における気象業務に関連する技術に関する研究のほか、本庁において現業化のための実用的な技術開発も行われている。

本章では、気象庁における研究・技術開発を推進するための部外との連携や庁内での調整等を実施する体制についてまとめる（個々の研究・技術開発については、各章参照のこと）。

【第1節】気象庁の技術開発推進体制について

1. 本庁における技術開発推進体制

後述するような庁横断的な技術開発の推進にあたり、総合的な調整を行っている企画課の技術開発推進体制の変遷について記述する。

（1）「技術開発調整官」の設置

平成7年11月に施行された「科学技術基本法」に基づき、平成8年7月に閣議決定された「科学技術基本計画」では、我が国の科学技術活動を巡る環境を抜本的に改善し、我が国の産学官全体の研究開発能力を引き上げるとともに、それが最大限発揮され、またその成果が円滑に国民や社会、経済に還元されるような施策を講じていくことが、科学技術振興における国の最優先課題として挙げられた。

一方、この頃、気象業務へのニーズが多種・多様化しており、気象庁がそれらの行政課題に適切に対応していくためには、多様な分野との関わりの中で研究・技術開発を実施する必要がある、また、気象庁内の各現業業務との関わりの中で総合的に調整の取れた計画を策定のうえ、現業化のための技術開発を実施する必要があった。

これらの状況を背景に、気象庁では気象行政課題に対応した高度な研究・技術開発の効果的な推進のための総合的・横断的な調整を的確に行うための体制として、平成9年4月に企画課に「技術開発調整官」を設置した。

（2）「技術開発推進室」の設置等の組織再編

平成28年1月に閣議決定された「第5期科学技術基本計画」では、我が国が目指すべき未来社会の姿として、ICTの活用を様々な分野に広げた「Society 5.0 超スマート社会」が初

めて提唱された。このような先端技術の展望を踏まえ、10 年程度の中長期を展望した気象業務のあり方について審議すべく、交通政策審議会気象分科会を開催し、平成 30 年 8 月に提言「2030 年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」をとりまとめた。この提言では、観測・予測精度向上に関する技術開発が重点的な取組事項のひとつに位置付けられるとともに、気象庁における業務体制の強化について検討する必要があるとされた。

気象庁では、それまでも観測・予測精度の向上に向けて大学や研究機関との懇談会の開催、共同研究等の連携した取組を進めてきたが、気象庁における技術開発関係の業務全体についてのマネジメント機能を強化し連携した取組を効果的に進めるために、令和 2 年 10 月の気象庁の組織再編では、技術開発を効率的に管理するため開発原課を同じ部に集約するとともに、庁内の技術開発の総合調整や外部機関との連携推進のための組織として企画課内に「技術開発推進室」を設置し、庁全体の技術開発を組織的に調整する体制を整えた。

2. 気象庁における庁横断的な技術開発推進体制

(1) 気象庁モデル技術開発推進本部

平成 8 年 3 月に数値予報を基盤とした新しい天気予報「地方天気分布予報」と「地域時系列予報」が開始され、1 か月予報に力学的手法が導入されるなど、数値予報モデル技術が予測技術基盤の中核となってくる中、数値予報モデル開発戦略を検討するため、平成 11 年 6 月に「気象庁におけるモデル開発戦略会議（委員長：参事官）」を設置した。同会議は平成 11 年 11 月に報告書を取りまとめ、数値予報モデル技術が極めて大規模な学際的技術となる中で、組織的対応や横断的な取組、系統的人材育成の不十分さ等から、気象庁のモデル技術が先進技術から若干の遅れが見られる等の問題が出てきていることを指摘した。この問題の解決には庁内のモデル開発に関する業務を集約した新たな組織を設立することが望ましいとされたが、それには大規模な組織改正を伴い、実現には一定の期間を要することから、現在の体制で実施可能な対応として庁内横断的な組織によりモデル技術開発計画の策定や開発の推進にあたることを提案した。

この報告を受けて、気象庁では平成 11 年 11 月に気象庁長官を本部長とする庁横断的な組織である「気象庁モデル技術開発推進本部」を設置し、気象庁全体で開発計画を検討し、開発の推進を図ることとした。本部には、本部を補佐するための幹事会とモデル開発に関する専門的な事項を処理させるための開発部会として、全球大気モデル、大気・海洋結合モデル、海洋モデルを担当する「グローバルモデル部会」、局地モデル、台風モデル、領域モデルを担当する「メソモデル部会」、各種モデルのデータ同化及び関連する処理技術を担当する「データ同化部会」を設置した。

「気象庁モデル技術開発推進本部」では、平成 12 年 3 月の本部会議にて、向こう 5 ～ 10 年を展望するモデル開発中長期計画の基本方針をとりまとめた後、各部会における中長期計画を作成し、計画の進捗についての報告やそれによる計画の見直しを行いつつ、モデル技術開発を推進した。また、平成 20 年 3 月には平成 23 年度末から稼働する新しいスーパーコンピュータで実用化すべき開発課題を中期開発計画としてまとめた。

「気象庁モデル技術開発推進本部」では、モデル開発人材の育成やモデル開発における部外

との連携促進についても取組を行った。本庁におけるモデル開発者育成のため、平成 12 年度から地方官署の職員を 2 年間モデル開発部局（数値予報課及び気候情報課）に配置することで実践的な育成を行う滞在型 OJT 研修（モデル開発者特別研修（1））と、数値予報モデル技術の開発に必要な基礎知識・技術の習得を図ることを目的とした新任者研修（モデル開発者特別研修（2））を開始した。また、衛星データの高度利用を図るため、気象衛星センターと数値予報課との間で平成 12 年度から 3 年を区切りとして気象衛星センター担当者を数値予報課に併任し、衛星データ同化に関する共同開発を行った。気象衛星センターとの共同開発の結果、複数の課題について現業化が見込まれるなどの成果があり、また、衛星観測データの有用性は一層増加すると考えられることから、気象衛星センターと数値予報課との共同開発体制は継続・発展することとなった。

地方における人材育成としては、地方官署におけるメソモデルを利用した調査研究を推進するため、平成 12 年度からモデルに初めて触れる職員にも扱える入門版の数値モデルとして、PC 上で非静力学メソモデルを実行できる PC 版 NHM を地方官署に配布した。ただし、PC 版 NHM は取扱いが簡便であるが実際の気象条件に即した初期値の設定ができないことから、平成 13 年 7 月には現業の初期値を利用可能な非静力学メソモデルとして、本庁に設置した防災情報モデル開発システムに接続して利用するミニスーパー版 NHM を用意した。平成 17 年 6 月には Linux 上でミニスーパー版と同等の実験等ができる Linux 版 NHM を、平成 20 年 7 月には Windows 上でも実行可能とする DVD-NHM を地方官署へ配布し、メソモデルを利用した調査研究環境の整備を進めた。これらの環境整備に加えて、地方官署でのメソモデル利用者間の意見交換、本庁からの指導などを行い、地方における調査研究を更に効果的に推進するため、平成 12 年度から平成 21 年度まで「地方におけるメソモデルを使った調査に関する打合せ会」を開催した。

そのほか、大学等の国内諸機関と連携し、数値モデルの利用促進と技術開発の一層の進展を図るため、平成 12 年度から気象庁が保有する数値モデルを一定の条件のもとに貸与するとともに、国内モデル開発者間の技術交流の場として「気象庁モデルフォーラム」を毎年開催し、気象庁の数値モデルについての紹介や情報提供を行った。「気象庁モデルフォーラム」は平成 17 年度には当初の目的を達成したことから、連携・共同の取組を一層強化するため、最新のモデル研究・技術課題に焦点を当てた技術交流の場と位置付け、「気象庁数値モデル研究会」に名称を変更した。また、平成 13 年 12 月には、気象庁の数値予報モデルの貸与を受けている大学や研究機関等との連携を強めるため「数値予報研究開発プラットフォーム」を設置し、当初は CD-ROM の郵送で行っていた数値予報モデルの貸与がインターネット経由で実施できるようになりモデルの配布が効率的になったことに加え、研究者が改訂したモデルのソースコードや独自開発ツール等を掲載できるようになった。

平成 21 年 3 月には、「気象庁モデル技術開発推進本部」が発足して 10 年になる節目を迎えることから運営の見直しが行われ、それまでの活動が開発の実施状況の把握や促進に重点が置かれモデル技術開発の戦略に関する議論が十分には行われていないこと、10 年の間にモデル開発の対象が増大したこと、複数の部会にまたがる開発課題が増加してきたことから、これまでの部会別の検討では、最新の社会的なニーズに応えるために適用可能なモデル技術を集約・

高度化するなどの対応を迅速に行えない可能性が大きいことが問題点としてあげられた。このような問題点を解決し、効率的かつ柔軟な検討をするためにこれまでの3部会を廃止し、モデル開発に関わる実質的なリーダーによって構成することで総合的な企画力・調整力を持った運営委員会を幹事会のもとに設置した。さらに、運営委員会のもと、担当する事項検討又はモデル開発の推進のためのサブグループを設置することとし、開発課題別に進捗状況の調査、中期計画の見直し等を行う「開発課題別サブグループ」と今後の業務の展望、科学技術の進展の見通し、計算機の更新計画などを踏まえて、集中的に重要な事項について検討する「重要事項検討サブグループ」の2種類のサブグループを設置した。「開発課題別サブグループ」として設置された、「全球サブグループ」、「メソサブグループ」、「衛星サブグループ」、「大気海洋結合サブグループ」では、各課題の達成状況中期計画の見直しのとおりまとめを行い、「重要事項検討サブグループ」としては、「全球非静力学モデル検討サブグループ」、「力学的短時間予測モデル検討サブグループ」、「物質循環モデル検討サブグループ」、「陸面モデル検討サブグループ」の4つのサブグループを設置し、それぞれの課題について国内外の技術の動向をレビューして今後の開発方針を集中的に検討した。

(2) 豪雨監視・予測技術開発推進委員会・静止衛星データ利活用技術検討会

モデル開発を推進する「気象庁モデル技術開発推進本部」による体制以外には、豪雨の監視・予測の技術開発と静止衛星データ利活用の技術開発でも、分野横断的な検討が可能となるようそれぞれ庁内横断的な体制により、方針や計画を作成して技術開発を推進した。

豪雨の監視・予測の技術開発については、平成20年夏に、都市河川の親水公園や下水道管渠内での作業中に突然降り出した雨による急な増水による災害が相次いだことを踏まえ、交通政策審議会気象分科会でこのような局地的な大雨から国民を守るための気象業務のあり方について審議され、平成21年6月に気象分科会の報告「局地的な大雨による被害の軽減に向けた気象業務のあり方について」において「観測・予測システムと気象情報の改善を計画的かつ着実に進めていくべき」との提言を受けた。また、平成22年度出水期には市町村を対象とする注警報の発表開始を予定しており、一層きめ細かく高精度の降水の実況監視と予測が求められていたことを受け、平成22年1月には、降水量分布予測（24時間先まで特に予報時間1～3時間）の高精度化を第一の目的として、運動学的予測分野及び診断的予測分野における技術開発を推進するため、庁内横断的な開発体制として「豪雨監視・予測技術開発推進委員会」（委員長：参事官）を設置した。

静止衛星データ利活用技術の技術開発については、平成21年7月に製造を開始した当時の次期静止気象衛星である「ひまわり8号・9号」の観測機能を、平成27年度の運用開始後すみやかに気象業務に活用するために、既存の衛星データの利用技術の開発計画と連携させながら、開発計画の作成、開発技術の評価や工程管理を行う「静止衛星データ利活用技術検討会」（委員長：参事官）を設置した。

(3) 気象庁技術開発推進本部

ア. 気象庁技術開発推進本部の設置

平成22年3月には、数値モデルの技術開発を行う「気象庁モデル技術開発推進本部」、豪雨の監視・予測の技術開発を行う「豪雨監視・予測技術開発推進委員会」、次期静止気象衛星

の利活用の技術開発を行う「静止衛星データ利活用技術検討会」の3つの技術開発体制があったが、これらの技術開発間における情報共有と相互連携を行うことにより一体的な推進を図るとともに、共通する外部機関との連携・協働の促進等による戦略的な方針と計画の作成を通じた総合的な技術開発体制を構築することを目的として、新たに「気象庁技術開発推進本部」（本部長：気象庁長官）を設置した。また、その下にモデル開発に関する基本方針及び開発計画の作成並びに推進に関することを審議する「モデル技術開発部会（旧 気象庁モデル技術開発推進本部）」、豪雨の監視・予測の技術開発に関する基本方針及び開発計画の作成並びに推進に関することを審議する「豪雨監視・予測技術開発部会（旧 豪雨監視・予測技術開発推進委員会）」、次期静止気象衛星データを用いたプロダクト開発に関する基本方針及び開発計画の作成並びに推進に関することを審議する「静止衛星データ利活用部会（旧 静止衛星データ利活用技術検討会）」を設置した。

イ. モデル技術開発部会

「モデル技術開発部会」では、課題ごとにモデル開発計画を管理する開発課題別のグループに加え、その時々課題によって重点的に検討を行う作業グループを設置して全庁的な開発を効率的に行うための検討や、次世代の全球モデルについての検討など専門的な事項についても審議を行った。

平成29年7月には、高度化・複雑化する数値予報モデルの開発にあたり、気象庁だけでなく関連する大学や研究機関が持つ知見を結集し、現業気象予報の精度向上に資することを目的として、外部の専門家からなる「数値予報モデル開発懇談会」の第1回を開催した。

平成29年度には10世代目の気象庁スーパーコンピュータへの更新を平成30年度に控えることから、更に次の世代のスーパーコンピュータまでを含む10年間を対象としたモデル開発中長期計画の検討を本格化した。検討にあたっては、気象分科会における「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」についての審議や「数値予報モデル開発懇談会」での議論や意見を踏まえ、平成30年10月に「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」を策定し、気象・気候予測の根幹である数値予報の技術開発を重点計画に沿って進めることとした。令和元年6月には「数値予報モデル開発懇談会」の運営を通じた数値予報技術開発重点計画のフォローアップをはじめ、モデル開発に関する外部連携や庁内の連携促進を総合的に推進するため、モデル開発連携調整グループの新設も行った。

ウ. 豪雨監視・予測技術開発部会

「豪雨監視・予測技術開発部会」では、運動学的予測技術に関係するほかの開発計画と連携させながら、開発計画の作成、開発技術の評価や工程管理を行う「運動学的予測グループ」と、診断的予測技術に関係する他の開発計画と連携させながら開発計画の作成、開発技術の評価や工程管理を行う「診断的予測グループ」の2つの作業グループを設置した。「運動学的予測グループ」では、解析雨量やナウキャスト等のレーダー関連プロダクトの開発を行い気象情報の高度化に貢献した。「診断的予測グループ」では、豪雨の事例解析や統計調査から豪雨に関する新しい着目点を発見し、予報現業での活用を開始した。また、可視化ツールの整備、予報業務に必要な知識を体系的にまとめた教科書や段階に応じた予報技術向上の方策を示した指針の作成、地方官署への技術指導を実施し予報担当者の人材育成を行った。

エ. 静止衛星データ利活用部会

「静止衛星データ利活用部会」では、次期静止気象衛星（ひまわり 8 号・9 号）に搭載予定の新センサーの利用技術に係る開発計画の作成とその管理を行う「新センサー利活用技術検討グループ」と、ラピッドスキャン（高頻度で日本周辺領域を観測する機能）観測に対する庁内ニーズを取りまとめるとともに、そのデータの利用技術に係る開発計画の作成とその管理を行う「ラピッドスキャン観測利用技術検討グループ」の 2 つの作業グループを設置した。「新センサー利活用技術検討グループ」では、新センサーで取得したデータから基本雲プロダクト、風ベクトル、火山灰、黄砂分布等を算出するアルゴリズム開発を行った。「ラピッドスキャン観測利用技術検討グループ」では、「ひまわり 6 号」による高頻度観測を実施し、高頻度衛星風の数値予報システムでの利用手法を検討するとともに、ラピッドスキャン観測データの利用検討に資するため、庁内だけでなく航空利用者や研究者など庁外へのデータ提供を行った。

平成 26 年度には、衛星データ利用に関して、庁内の技術開発体制の強化及び部外の研究者との連携強化の観点から、静止気象衛星と極軌道衛星を共に扱う体制への拡充・拡大についての検討が「静止衛星データ利活用部会」で行われた。次期静止気象衛星については、データの利用分野の拡大、プロダクト開発は今後も継続して尽力することが必要であり、また、極軌道衛星等については、データ取得等について庁内の連携が不十分との議論により、部会はそのままとしつつも、極軌道衛星の庁内データ利用の窓口は可能な範囲で気象衛星課に一本化するとともに、部会の 2 グループについては次期静止気象衛星のデータを用いたプロダクトなどの開発・利用計画の作成や管理を行う「衛星利用技術開発推進グループ」への統合を行った。平成 27 年 7 月の「ひまわり 8 号」の運用開始後には、様々なプロダクトの利用を開始したほか、国際会議開催や研究コミュニティへのデータ提供など部外でのデータ利用推進も図られた。

オ. 気象庁技術開発推進本部の体制変更

平成 29 年度には「ひまわり 8 号」が安定運用され、実況監視へのひまわり衛星の高頻度プロダクトの利用拡大が予想される中、実況監視・予測に関する技術開発について連携を強化するため、「豪雨監視・予測技術開発部会」と「静止衛星データ利活用部会」の 2 部会を統合し、「実況監視・予測技術開発部会」を設置した。「実況監視・予測技術開発部会」の検討体制としては、庁内のガイダンス等の統計的プロダクトの担当者の繋がりを強化し、それぞれの作成手法、ノウハウ及びツールの共有を行うことによって、統計・機械学習プロダクトの高度化及び技術者の育成を目的として平成 28 年度に準備活動を実施した「ガイダンスグループ」を正式に発足させ、「運動学的予測グループ」、「診断的予測グループ」、「ガイダンスグループ」、「衛星利用技術開発推進グループ」による 4 グループで、引き続き活動を行った。

平成 30 年度には、8 月の気象分科会提言を踏まえた新たな目標に基づく「気象庁技術開発推進本部」の体制刷新として、人材育成策や地震火山分野を含め当庁の技術開発全体の総合的な検討・調整を行っていくことが議論された。令和元年 6 月には地震津波火山分野の技術開発についても、地震火山部における技術開発部会を「気象庁技術開発推進本部」の「地震火山技術開発部会」と位置付け、その活動について本部に報告することとし、また、めざましい発展がみられる AI 技術の活用を全庁的に推進するために、部会に属しない臨時の作業グループとして「AI グループ」を新設し、AI に関する技術開発の進捗管理や AI 関連技術の情報共有

及び新規課題、部外連携、人材育成策等の検討を行った。

(4) 気象庁技術開発推進委員会

令和2年10月には、気象分科会の提言や数値予報技術開発重点計画の策定などにより庁全体の技術開発の方向性が明確となったことや、組織再編により開発原課が同じ部に集約され技術開発を効率的に管理できるようになったことを受け、「気象庁技術開発推進本部」を発展的に解消し、開発の管理等は各部で行うこととし、全庁的な調整のための組織として「気象庁技術開発推進委員会」（委員長：気象庁長官）を立ち上げた。「気象庁技術開発推進委員会」では、気象分科会提言への対応を含む様々な検討や横断的な調整を図る場として、それぞれ気象・気候分野と地震・津波・火山分野における技術開発の審議を行う「気象気候部会」、「地震津波火山部会」と技術開発にあたる人材の育成に係る課題の検討等のための「人材育成部会」を置いた。「気象庁技術開発推進委員会」では、本庁での技術開発だけでなく本庁業務に関連の深い気象研究所の研究についても取り扱うこととしており、気象研究所とも連携して、技術開発に関する調整や全庁的な課題についての議論を行っている。

【第2節】外部と連携して進める技術開発・研究について

1. 共同研究

気象庁では、大学、国立試験研究機関との共同研究にあたり、昭和30年4月に定めた「委託業務および協同業務の取扱要領の実施について」により長らく実施してきた。昭和61年11月の「研究交流促進法」の制定や昭和62年3月の「産学官及び外国との研究交流の促進に関連する諸制度の運用に関する基本方針について」の閣議決定により、国の試験研究機関においても産官学の共同研究を推進することとされたことを契機に、気象庁としてもこれらに積極的に対応することとして要領の見直しが進められた。平成6年1月には、それまで公共機関等に限定していた共同機関を民間の機関も含めるようにし、今日まで各部署が目的に応じ個別に外部の機関と共同研究契約を結び、気象、海洋、地震、火山等に関する様々な調査・研究を実施している。

平成19年には、我が国における気象研究の発展、大学等における気象研究分野の人材育成、気象庁の予測精度向上を目的として、公益社団法人日本気象学会と共同研究「気象庁データを利用した気象に関する研究」を開始したように組織間での包括的な共同研究も実施している。そのほか、科学研究費助成事業などの競争的研究費を活用する研究では、大学や研究機関及び民間企業も参加する研究体制で実施されることが多いことから他機関との連携の場となっており、内閣府が推進する戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第二期（平成30年度～令和4年度）で実施された研究開発「線状降水帯観測・予測システム開発」では、多くの機関が連携して実施する線状降水帯の早期予測の高度化と利活用の研究に協力した。

令和2年には交通政策審議会気象分科会が開催され、急激に変化する社会環境や増大・多様化する気象業務に対するニーズに的確に対応していくため、提言「気象業務における産学官連携の推進」がとりまとめられた。この提言では、産学官の連携によって気象業務における取組への相乗効果を得ることや、技術や人材等の効率的なリソースの活用を最大限活用することが提言された。令和4年9月には、共同研究等における産学官連携の推進に当たって、気象

情報の部外提供のあり方（データポリシー）や知的財産戦略を一体的に検討するため、気象情報利活用促進委員会の下に新たに「データポリシー・知的財産戦略検討部会」を設置した。

2. オールジャパンで取り組む線状降水帯予測精度向上に向けた技術開発・研究

平成 26 年 8 月豪雨では、豊後水道から流入した大量の水蒸気の影響により広島と山口の県境付近で積乱雲が次々と発生し、複数の積乱雲群が連なる線状降水帯が停滞すること（バックビルディング型形成）で集中豪雨となり、広島市で死者 77 名（平成 28 年 6 月 24 日現在、総務省消防庁調べ）の被害をもたらした土砂災害が発生した。「線状降水帯」という単語は、それまでも九州の地形に起因する線状の降水システムに対する呼称として平成 12 年頃から気象研究所を中心とした研究者によって使用され、平成 19 年に発行された『豪雨・豪雪の気象学』で学術用語として定義されたものだが、この災害を期に頻繁に使われるようになり、平成 29 年には「現代用語の基礎知識」選ユーキャン新語・流行語大賞に「線状降水帯」がノミネートされている。

平成 26 年 8 月豪雨をはじめとして 1 時間降水量が 50 ミリ以上の非常に激しい雨が各地で頻発するなど、雨の降り方が局地化、集中化及び激甚化している状況を「新たなステージ」と捉え、国土交通省交通政策審議会気象分科会では、気象庁がこのような状況において防災・減災のために取り組むべき事項について審議を行い、平成 27 年 7 月に気象庁への提言「「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」をとりまとめた。提言では、集中豪雨をもたらす線状降水帯の形成・停滞のメカニズムが十分に解明されておらず、集中豪雨がいつ、どこで発生し、どのくらいの雨量になるかを精度よく予測することは困難であることが課題として挙げられ、その対策として集中豪雨をもたらす線状降水帯のメカニズムを解明するため、その形成に大きく関係している水蒸気の監視技術を高度化するとともに、数値予報の高度化に着実に取り組んでいく必要性が指摘された。気象庁では提言を受けてそれらの取組を進めていったが、その後も線状降水帯は平成 27 年 9 月関東・東北豪雨や、平成 29 年 7 月九州北部豪雨、平成 30 年 7 月豪雨で発生し、甚大な災害をもたらした。

平成 30 年 8 月に国土交通省交通政策審議会気象分科会が今後 10 年程度の中長期を展望した気象業務のあり方についてとりまとめた提言「2030 年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」では、線状降水帯に伴う集中豪雨に対して夜間の大雨にも明るいうちから対応できるよう、おおむね 3～5 年後にはメソアンサンブル予報や AI を活用し、半日程度先までに特別警報級の大雨となる確率のメッシュ情報を提供するとともに、2030 年には数値予報技術の大幅な高度化により、集中豪雨をより高い精度で更に地域を絞って予測し、大雨・洪水警報の「危険度分布」を更に高度化することが具体的な目標として挙げられた。

こうした中、令和 2 年 7 月豪雨では、線状降水帯が九州で多数発生したが事前に予測できず、線状降水帯の予測精度に関わる課題が改めて明らかになり、赤羽国土交通大臣から、気象庁に対し線状降水帯等による大雨の予測精度向上に取り組むよう指示があった。気象庁では線状降水帯の予測精度向上に向けた課題として、「観測の強化」、「予測の強化」及び「情報の改善」の 3 つの柱に改めて整理するとともに必要な取組の方向性を決め、これらの取組を加速させるため、令和 2 年 8 月に線状降水帯予測精度向上を目的とした庁内横断的なタスクフォー

ス「線状降水帯予測精度向上タスクフォース」を設置した。さらに大学や研究機関の専門家の協力を得て、線状降水帯に関する最新の研究の知見を取り入れながらこれらの取組を進めるため、令和2年12月に部外有識者を含めた「線状降水帯予測精度向上ワーキンググループ」（主査：東京大学 佐藤正樹教授）を立ち上げた。

これらの予測精度を向上させるための取組に並行して、線状降水帯による大雨の予測精度に課題がある中での線状降水帯に関する情報の発信について、令和2年7月から令和3年4月にかけて「防災気象情報の伝え方に関する検討会」において、有識者、報道関係者、自治体関係者、関係省庁とともに検討が行われた。この検討会での結果を踏まえ、大雨による災害発生の危険度が急激に高まっている中で、線状の降水帯により非常に激しい雨が同じ場所で降り続けている状況を「線状降水帯」というキーワードを使って解説する情報「顕著な大雨に関する気象情報」の運用を令和3年6月から開始した。本情報を発表するにあたって、国立研究開発法人防災科学技術研究所、一般財団法人日本気象協会、気象研究所の研究グループが内閣府の戦略的イノベーション創造プログラムの課題「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」において開発した線状降水帯の自動検出技術を活用した。

令和3年7月には、1日から3日の東海地方・関東地方南部を中心とした大雨により静岡県熱海市に大規模な土石流被害が発生した。「令和3年7月1日からの大雨非常災害対策本部会議（第3回）」では、菅首相から、甚大な被害をもたらしかねない線状降水帯について、予測の精度を向上させるために、研究開発への支援などを抜本的に拡大し、計画を前倒しで実現できるように取り組んでいく旨発言があった。これを受けて、気象庁では線状降水帯の予測精度向上に向けた取組の強化・加速化のため、過去最多の額となった令和3年度補正予算を活用し、観測の強化として観測機器の整備の前倒しやマイクロ波放射計等の新たな観測機器の整備、予測の強化として線状降水帯を予測するためのスーパーコンピュータの整備やスーパーコンピュータ「富岳」を活用した予測技術の開発などを進めることで、情報の改善計画を前倒した。

令和4年には、気象庁の海洋気象観測船と海上保安庁の測量船による観測（令和3年に開始）に加えて、民間船舶の協力も得て東シナ海から西日本太平洋側、関東に至るまでの幅広い海域をカバーする海上の水蒸気観測を拡充するなど観測の強化を進めるとともに、文部科学省・国立研究開発法人理化学研究所の全面的な協力により、6月から10月にかけてスーパーコンピュータ「富岳」を活用した高解像度局地モデル（水平解像度1km、予報時間18時間）のリアルタイムシミュレーション実験を実施するなどの予測技術開発を進めた。6月にはそれまでに実施した観測・予測の強化の成果を踏まえ、広域を対象として線状降水帯による大雨となる可能性の半日程度前からの呼びかける情報（以下「線状降水帯の半日前予測」という。）の提供を開始した。また、線状降水帯機構解明に向けた産学官連携の取組の一つとして、2月には、線状降水帯予測精度向上ワーキンググループ第3回会合（令和3年12月）の議論を受け、大学や研究機関の研究者と気象庁の関係官が一堂に会して線状降水帯の機構解明研究の着目点・観測手法等を議論するための「線状降水帯の機構解明に関する研究会」を設置した。出水期には、線状降水帯の発生・維持等のメカニズムを解明するため、大学や研究機関との連携のもと、集中観測を実施し、「線状降水帯の機構解明に関する研究会」で解析の成果を逐次共有すると

ともに、課題意識を明確にして研究を進めた。

令和 5 年には、線状降水帯等の予測精度を抜本的に向上させるため、大気の高次元観測機能など最新技術を導入した次期静止気象衛星「ひまわり 10 号」の令和 11 年度の運用開始を目指し、製作に着手した。3 月には、線状降水帯の予測精度向上のために当時運用中のスーパーコンピュータ（NAPS10）の約 2 倍の計算能力をもつスーパーコンピュータ「線状降水帯予測スーパーコンピュータ」の稼働を開始した。9 月には、数値予報における観測データの利用手法高度化を通じた線状降水帯の予測精度向上に向けて、スーパーコンピュータ「富岳」を活用し、大学や研究機関と連携した共同研究を開始した。情報の改善については、5 月には、令和 3 年から提供している「顕著な大雨に関する気象情報」を、線状降水帯による大雨の危機感を少しでも早く伝えるため、予測技術を活用し、最大で 30 分程度前倒しして発表する運用を開始した。

令和 6 年には、3 月に新しいスーパーコンピュータ（NAPS11）の運用を開始し、更新前の約 2 倍の計算能力となった。また、スーパーコンピュータ「富岳」にて実施した技術開発の成果を活用し、水平解像度 2km の数値予報モデル（局地モデル）の予報時間を 10 時間から 18 時間に延長するなど、予測の強化を進めた。情報の改善については、5 月には、広域を対象として発表していた線状降水帯の半日前予測を府県単位で発表する運用を開始した。

「2030 年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」で提示された目標に向けて、令和 7 年以降も引き続き水蒸気観測等の強化や技術開発を進め、令和 8 年には、局地モデルアンサンプルの運用開始及び局地モデル高解像度化（水平解像度 2km → 1km）といった予測の強化を予定している。また、それまでの観測・予測の強化の成果を活用し、2～3 時間前に線状降水帯の発生を予測することを計画している。令和 11 年度には次期静止気象衛星「ひまわり 10 号」の運用開始が予定されており、その観測データを活用し、数値予報モデルの予測精度を向上させ、線状降水帯等による大雨に伴う災害発生の危険度を市町村単位で発表することを目指している。

3. 技術的な刊行物

(1) 概要

気象庁は、観測・調査・研究の成果を気象庁内外の利用に供するため、多種の刊行物を発行している。そのうち、全国的基盤に立った技術的な刊行物としては、主として業務的内容をもつ「測候時報」、調査研究誌としての「気象庁研究時報」・「気象庁欧文彙報」及び技術的調査報告としての「気象庁技術報告」がある。これらの技術的な刊行物の編集・刊行業務は、図書課や企画課図書資料管理室といった図書管理業務を所掌する部署で実施していたが、気象庁職員の技術向上及び気象業務に関連する技術の普及に資することから、平成 17 年 4 月に企画課の技術開発に関する業務の一環とすることで強化し、令和 2 年 9 月の組織再編後には企画課技術開発推進室の担当となった。

平成 24 年には「電子行政オープンデータ戦略」の策定等、政府として電子行政を推進する中、技術開発の部外連携の促進のため研究者が気象庁の技術的な刊行物を容易に取得できるよう、気象庁ホームページでの公開を開始した。長らく続けてきた冊子体による刊行は令和 4

年3月に完全に終了し、あわせて利便性向上のためオンライン ISSN の取得も行った。電子媒体のみの発行とすることで、分量の制約がなくなるほか柔軟な発行が可能となり、より機能性が高い刊行が可能となった。

なお、気象庁ではこのほかにも、各業務において専門的な刊行物を発行しており、ここでは地震火山業務関連の刊行物であり、長い歴史をもつ「験震時報」についても記載する。

(2) 各刊行物の変遷

ア. 測候時報

「測候時報」は、全国の気象庁職員を対象として気象業務各部門の活動に関する情報を提供するとともに、学問技術の進歩や関連する内外の動きを伝えることによって技術水準の向上をはかり、気象業務全体の有機的かつ効率的運営に資することを目的として昭和5年9月に創刊された。当初は公報やニュース的な内容であったが、昭和20年からの休刊の後、昭和23年に復刊した際に今のような技術誌となり、現在では最も投稿数が多い技術的な刊行物となっている。

イ. 気象庁研究時報

「気象庁研究時報」は、全国の気象庁職員が行った気象業務に関連する分野の調査研究の成果を発表する場として昭和24年に創刊された。気象庁研究時報は学会誌とは異なり気象業務の現場に根差した気象官署職員の調査研究の成果を収録し、気象技術の改良、技術者の育成に貢献する任務を担っている。その編集方針は、内容を一層充実したものにするため昭和45年6月に設置した気象庁研究時報編集委員会で定められており、原稿の掲載にあたっては、気象庁内外の専門家の閲覧に基づき、気象庁研究時報編集委員会が行っている。

昭和52年には、気象庁研究時報別冊として各管区・沖縄気象台の気象研究会誌上から選考した調査・研究を掲載する「管区気象研究会誌選集」の刊行を開始した。「管区気象研究会誌選集」は、全国気象官署職員による調査・研究成果をとりまとめることで、気象業務の遂行に有効な資料や情報を提供するとともに、更なる調査・研究活動の発展に寄与することを目的に開始したものであったが、平成13年に行われた刊行物の見直しの際に、気象研究会誌等と重複することを理由に、平成12年度の52巻別冊をもって刊行を取りやめることとなった。

ウ. 気象庁欧文彙報

「気象庁欧文彙報」は、気象庁職員が行った調査研究の成果を欧米の気象関係者に紹介することを目的とする英文の調査研究誌として大正15年に創刊した。平成7年1月に、気象庁の知見がより世界で活用されるよう、新たに第2輯としてフォーマットをB5版からA4版に変更し、掲載内容についても気象業務の紹介を含めるなど刊行方針の変更を行ったが、気象庁職員による調査研究の成果を世界に紹介する場としては、国際的に流通する英文の学会誌等が広く利用されるようになったことから、「気象庁欧文彙報」はその役割を終えたものとし平成12年度末をもって刊行を終了することとなった。

エ. 気象庁技術報告

「気象庁技術報告」は、昭和5年に創刊した「中央気象台（気象庁）彙報」が前身である。「中央気象台（気象庁）彙報」は、気象庁職員が業務上実施した調査研究のうち、速報を要するものは日本気象学会の気象集誌に掲載していたところ、それまでの報告をまとめた冊子として創

刊されたが、昭和 35 年 3 月に「中央气象台（気象庁）彙報」の第 40 冊第 4 号をもって技術的な調査報告のうち、学術的でないものを刊行する方針に変更し、誌名を「気象庁技術報告」と改めた。内容は限定されていないが、災害をもたらした自然現象について、詳しく調査・分析することにより、自然現象に対して更なる理解を促進し、防災関係機関等の防災業務や調査・研究における利用に資する資料として、地震・火山を含む異常気象災害の調査に関するものが主要な位置を占めている。

昭和 54 年度に定期刊行物の見直しを行い、それまで多岐にわたっていた内容を全国的観点から調査し、本庁の担当部署で精査したものを掲載する方針とし昭和 56 年 3 月に刊行要領を定めた。

オ. 験震時報

「験震時報」は、全国気象官署の現職員及び、退職後、出向中の元職員が行った気象庁の地象業務に関する研究・調査、解説、その他業務上必要な記事を掲載するもので、関東大震災を契機に験測に従事する職員の地震学に係る必要な知識の習得や測候所間の情報共有を目的として大正 14 年 3 月に創刊され、平成 13 年度に「地震火山技術通信」と統合した。より多くの方々に広く利活用してもらうため、平成 26 年からは、冊子の刊行に加え気象庁ホームページでの公開を開始するとともに、過去に刊行した全巻も電子化のうえ、あわせて公開した。その後、冊子の刊行は平成 28 年 3 月に終了した。

なお、平成 9 年からの地震の一元化処理により、気象庁データのみならず、大学等、他機関の観測データを含め気象庁に集約された地震波形等のデータを処理し、日本全国の地震火山観測データとして広く利用されていることから、「験震時報」においては調査・研究的なものに限らず、気象庁におけるデータ処理の手法に関する業務的なことがらも広く内外に周知する必要があると認められる場合は、掲載している。

第2章 気象研究所

【第1節】気象研究所来歴

1. はじめに

気象研究所は昭和21年2月の創立以来、我が国の気象業務を担う気象庁の施設等機関として、また、地球科学全般にわたる主要な研究機関として、特に筑波研究学園都市移転後は、近隣の研究機関をはじめ内外の関係機関との緊密な連携のもと、気象業務の改善・高度化や地球科学の発展に貢献すべく、基礎から応用に至る先進的な研究活動が続けてきた。

ここでは、気象研究所の来歴について、主に昭和50年3月刊行の「気象百年史」に記述されている以後のあゆみをたどる。なかでも、昭和55年6月の筑波研究学園都市への移転は大きな出来事であり、一つの項を設ける。全体の構成は次のとおりとした。2. 研究業務の変遷、3. 研究の枠組みと予算の変遷、4. 組織の変遷、5. 評価の枠組みの変遷、6. 広報活動等の変遷、7. 筑波研究学園都市への移転、8. 主な研究設備、9. 表彰からみた研究成果

2. 研究業務の変遷

ここでははじめに「気象百年史」に記されている昭和49年までの変遷を大まかに記し、その後の研究所を取り巻く状況の変化と、研究業務のあゆみをたどる。

(1) 昭和21年(1946年)～昭和49年(1974年)

気象研究所の歴史として、「気象百年史」には、昭和20年代を、「戦後の、予算の少ない苦難な数年間」であるが、「活発な学問追求と次代を担う若手の養成に意を用い、学界の中心となる素地を作った。」と記されている。昭和30年代は各種研究制度の確立、体制の充実など、「官庁研究機関としての機能と運用を行うようになり、いわゆる発展期に入った」と位置づけられている。

昭和40年代は部内共同研究の機運が高まるとともに、大型研究、国際協力研究、大型観測機器の研究開発などが相次ぎ、研究規模が飛躍的に拡大した。この時代において気象研究所の内部体制の整備と研究業務の効率的運用のためのルール化を行った。これにより、気象庁の附属機関としての機能が充実するとともに、気象庁の気象研究所に対する認識を一段と高め、他省庁を含む各種プロジェクトへの対応もできるようになった。これらの機能の充実を裏付けるように、研究規模・予算の側面で一段と飛躍することとなり、将来への展望を明るくした時代でもあった。

(2) 昭和50年(1975年)～昭和59年(1984年)

筑波研究学園都市への移転については、本節第7項「筑波研究学園都市への移転」に記す。筑波移転を機に研究環境が飛躍的に充実し、大きく活動の幅を広げた。移転と時期を同じくして、国の科学技術育成策が強化され、また地球規模の環境問題が全世界の重要関心事として取り上げられるようになった。貿易摩擦の緩和や不景気対策として度々補正予算が組まれ、気象

研究所の研究体制は急速に強化されていった。気象研究所の経常研究費は昭和 50 年に初めて 10 億円を超え、筑波移転前年の昭和 54 年以後は 20 億円を超えるようになった。筑波における各種実験施設（気象風洞実験棟、風浪実験水槽棟、実験廃水処理施設、高層測器実験棟、電気室、露場実験棟、放射観測棟、エーロゾル観測棟、低温実験棟、気象研究所電子計算機システム（HITAC M-200H）、地震重力観測棟、放射能観測実験棟）が昭和 55～56 年に完成した。本移転に伴い、研究発表会や国際会議の開催や一般向けのシンポジウム等の開催の機会も増えた。

刊行物としては、気象研究所技術報告の創刊（昭和 53 年）、気象研究所年報を改題し、「研究報告書」としての発刊（昭和 56 年）が行われた。

また、この期間の顕著な学術的な成果として、国際オゾンシンポジウム（ギリシャ・ハルキディキ、昭和 59 年 9 月）で高層物理研究部・忠鉢繁研究官が、南極上空のオゾン減少を示す観測結果を発表している。

（3）昭和 60 年（1985 年）～平成 6 年（1994 年）

気候変動や気象災害の激甚化に対応するため、研究体制の見直しを計った。科学技術庁の海洋開発調査研究促進費が昭和 63 年度に海洋開発及地球科学技術調査研究促進費となり、大幅な増額となったことなど、他省庁予算が増加した。そして研究活動の拡大、多様化、また総合化が著しく、国の内外との研究交流も活発化した。また、この時期に外国での会合への参加と外国の雑誌への投稿が増加した。

（4）平成 7 年（1995 年）～平成 16 年（2004 年）

気候変動やそれに伴う気象の変化に対する研究の重要性がますます高まった。また、国立研究機関の活性化に向け、科学技術基本法、科学技術基本計画の制定、行政改革、気象審議会による答申第 21 号などにより、研究者の流動性を基本とした研究システムのもと、競争的資金の拡大等、政府の研究開発投資が拡充されることになり、研究を取り巻く情勢が大きく変化した。

平成 8 年、気象研究所創立 50 周年。研究の一層の進展に努力する職員の決意の証として、気象研究所のシンボルマークとなるロゴマークが制定された。

平成 9 年 8 月、「国の研究開発全般に共通する評価の実施方法の在り方についての大綱的指針」が策定された。行政改革会議が進める省庁再編について、平成 9 年 12 月 3 日に出された行政改革会議の最終報告において、気象庁は国土交通省の外局として「気象業務の健全な発達を図ることを任務」として、また気象研究所は「気象業務に関する技術に関する研究」を行う気象庁の施設等機関として存続が認められた。この期間の特筆すべき成果として、昭和 55 年以降、主として予報研究部によって行われてきた、気象研究所非静力学モデル（MRI-NHM）の現業化と学術分野への貢献があげられる。MRI-NHM は平成 11 年から 15 年に大学や研究機関などと協働して行われた九州や北陸・新潟地方での豪雨・豪雪に関する大規模な特別観測とリンクして、メソスケール研究のブレークスルーとなった。また、MRI-NHM は平成 13 年から数値予報課で気象庁非静力学モデル（JMANHM）として開発が進められ、平成 16 年にメソモデル（MSM）として現業化された。マニュアルやグラフィカルユーザーインターフェースの整備が行われ、気象官署における調査研究、さらに気象庁の「数値予報研究開発プ

ラットフォーム」の枠組みで外部へのモデル貸与が行われた結果、大学や研究機関など気象庁、国内を超えて広く研究・開発に多大な貢献を果たした。

また、平成 11、12 年度は「気象研究所 4 次元同化システムの構築」が、予報、気候、台風の各研究部の参加する所内共同研究として実施され、その後、気象研究所においてデータ同化の研究が積極的に取り組まれることとなった。変分法データ同化は全球測位システム（GPS）による可降水量やマイクロ波放射計による輝度温度の直接同化等、観測データ利用を劇的に拡充していった。アンサンブル手法も含めデータ同化に関する研究は、海洋や地震津波火山分野も含め、大きく発展していった。

（5）平成 17 年（2005 年）～平成 26 年（2014 年）

平成 17 年 2 月に京都議定書（1997 年の COP3 で採択）が発効し、地球温暖化対策への実行が迫られることとなった。気象研究所では平成 18 年、雲スキームの改善などにより雲量と雲放射効果の分布を改善し、気象研究所気候モデル（MRI-CGM2.3）を開発し、IPCC 第 4 次評価報告書に貢献した。平成 19 年、IPCC がノーベル平和賞を受賞し、翌年 4 月に IPCC から気象研究所に感謝状が授与された。平成 25 年 9 月に IPCC 第 5 次評価報告書が発表されたが、海氷モデルや生物地球化学過程も組込んだ海洋大循環モデル MRI.COM3（平成 23 年）、エロゾル輸送モデル MASINGAR mk-2 と結合させた MRI-CGCM3（平成 24 年）、大気化学気候モデル MRI-CCM2.0 や炭素循環過程を加えた地球システムモデル（MRI-ESM1）（平成 25 年）と、より高度な気候モデルの開発と実験を行い貢献するとともに、気象研究所からリードオーサーとして執筆に参加した。

この 10 年間では前半に独立行政法人化の検討が進められたが、平成 21 年 12 月末の閣議決定を受けて見送りとなった。独立行政法人化に向けて策定した中期計画・中期目標に準じ、平成 21 年度から新しい中期研究計画が開始された。平成 22 年度の研究計画では、独立行政法人化計画の見送りを受けて、平成 21 年度開始の中期研究計画の見直しを行い、「台風・集中豪雨」、「地震・火山・津波」、「気候変動・地球環境」の 3 つの分野に重点をおいて研究を行い、観測・実験、データ解析、モデル開発を融合的に進めることとなった。

平成 23 年 3 月 11 日、日本周辺では観測史上最大の規模となる「平成 23 年東北地方太平洋沖地震」（M9.0）が発生し、大津波が襲った東北地方太平洋沿岸を中心に甚大な被害が発生した。気象研究所では、この地震による揺れ（つくば市内では震度 6 弱を観測）により、ロビーの壁のタイルの剥落、配管や研究用の器材の損傷など物的被害が発生したが、幸いにも人的な被害はなかった。関東地方で電力需給が逼迫した状況下において、気象研究所においても大型電子計算機の運用を停止するなど、最大限の節電を行いつつ業務を継続した。

平成 16 年以後、気象研究所では、社会に甚大な被害を与える大気現象に関して即時的に要因分析を行い、速報として報道発表を行うといった取組を行うようになった。平成 24 年 5 月 6 日に発生した竜巻は、つくば市北部で死者 1 名を含む甚大な被害をもたらし、気象研究所からも現地調査に加わり藤田スケール 3 と評定された。同年 7 月には平成 24 年 7 月九州北部豪雨、平成 26 年 8 月には線状降水帯により広島市での大雨が発生する等の自然災害が頻発し、つくば竜巻を含めた顕著な事例に関してはその発生メカニズムなどについての速報的な報道発表を行っている。

気象研究所では平成 25 年度予算でフェーズドアレイレーダーの整備や平成 26 年度に地震津波研究部、火山研究部の新設が認められるなど、かつてないほど大きな予算が認められることとなった。

(6) 平成 27 年 (2015 年) ～令和 6 年 (2024 年)

平成 27 年 1 月、国土交通省は「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、交通政策審議会気象分科会は同年 7 月『『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』を取りまとめた。さらに平成 30 年 8 月には交通政策審議会気象分科会が「2030 年の科学技術を見据えた気象業務のあり方 (提言)」をまとめ、①観測・予測精度向上に係る技術開発、②気象情報・データの利活用促進、③防災対応・支援の推進、について重点的な取組事項を提言した。

平成 31 年 4 月開始の中期研究計画では、気象・気候分野においては、観測・予測技術基盤のモデリング技術を軸に研究開発を進める基盤技術研究、基盤技術を駆使し、自然災害や地球温暖化といった課題に取り組む課題解決型研究、関係分野とも連携しつつ、データの利活用をシームレスに推進する応用気象研究という新しい枠組みでの研究計画を進めていくこととなり、令和 6 年度開始の中期研究計画ではその枠組みを踏襲している。

IPCC 第 6 次評価報告書 (令和 3 年) に向けて実施された世界気候研究計画 (WCRP) の結合モデル相互比較プロジェクト第 6 世代 (CMIP6) では、MRI-ESM1 を改良した MRI-ESM2 (令和元年) が、参加した多くのモデルの中で、トップの成績を取めた。第 6 次評価報告書の第 1 作業部会報告書 (自然科学的根拠) に気象研究所からリードオナーとして 2 名が参加した。その中で、地球温暖化が進んでいることに加え、地球温暖化が人間活動の影響で起きていることを初めて「疑う余地がない」と評価し、気象研究所の研究に基づく気候変動の最新の知見も数多く盛り込まれた。

線状降水帯に伴う豪雨による甚大な災害の頻発により、その予測精度向上等に向けた取組の加速・強化が喫緊の課題となり、緊急研究「集中観測等による線状降水帯の機構解明研究 (令和 3 ～ 4 年度)」を実施した。また、令和 4 年 4 月には、10 名の定員増が実施された。

この間、深層学習など人工知能 (AI) の性能が急速に伸展し、自然科学の分野での利用が拡大してきた。令和 6 年度から開始される中期研究計画では、様々な研究で AI の利用に向けた研究課題が模索されている。

3. 研究の枠組みと予算の変遷

気象研究所の予算の「(項)」の区分は昭和 22 年度から昭和 34 年度までは「気象官署」であったが、昭和 35 年度から「気象研究所」となった。ここでは昭和 35 年度以後の予算の変遷を振り返る。

現在、気象研究所で行われている研究は、下記のように区分されている。

①経常研究 (気象業務の発展に資するため経常的に実施する研究)、②地方共同研究 (気象業務の現場において取り組むべき研究課題について、気象研究所と気象官署が共同して行う研究)、③緊急研究 (重大な災害発生時に、機動的に研究を行い、社会にいち早く情報を発信するため実施する研究)、④共同研究 (気象研究所が、その所掌事務と密接に関連する事項につ

いて、気象庁以外の者と共同して行う調査及び研究)、⑤公募型共同研究による研究(大学及び研究機関の教官又は研究者が研究代表となり、他の研究機関の研究者と共に、特定の研究課題について当該研究所の施設、設備、データなどを利用して共同で行う研究)、⑥他省庁予算による研究、⑦科学研究費助成事業による研究、⑧環境研究総合推進費による研究。

予算の面からみると、①国土交通省(平成13年度までは運輸省)本予算による経常研究など、②他省庁予算によるもの、③科学研究費補助金、④環境研究総合推進費によるもの、の四つに分けられる。このうち、④は平成28年度まで環境省予算からの移し替えであったものが、平成29年度から環境再生保全機構より助成されることとなった。

本予算の研究のうち、「国土交通行政において、特に重点的、緊急的に行う必要のある研究」は、特別研究費(昭和35年度～)や気候変動予測研究費(平成3年度～)として予算化されている。

ここでは、本予算による研究と、他省庁予算による研究について、経緯を振り返る。

(1) 国土交通省(平成13年度までは運輸省)本予算による経常研究など

ア. 昭和35年度(1960年度)～昭和39年度(1964年度)

昭和35年度、予算区分で「(項) 気象研究所」が設置され、予算144,926千円が配算された。

特別研究費としては、米国気象局の要請による(経費米側負担)台風に関する特別研究費(昭和35年度)、台風協同研究(昭和36～38年度)、ジェット機の運航に伴う高層気象解析の研究(昭和36年度)、集中豪雨雪の研究(昭和37～39年度)、道路整備特別会計から本州四国連絡橋にかかわる気象調査費(昭和38、39、41年度)、太陽活動極小期国際観測年(IQSY: International Quiet Sun Year)のための宇宙線観測の強化(昭和39年度)、国際地球内部開発に基づく総合研究(昭和39年度)、ドップラーレーダーの研究(昭和39年度)等が配算された。

なお、この期間には特別予算として国立機関原子力試験研究費(昭和32、34～42年度)も配算されている。

イ. 昭和40年度(1965年度)～昭和54年度(1979年度)

経常研究は遅くとも気象研究所年報の創刊された昭和40年から昭和53年までは①各研究部での経常研究と、②部を超えたプロジェクト的総合研究の二つに区分されていた。ただし昭和48年から昭和53年には環境庁特別研究も②のカテゴリーに含まれていた。さらに、「準特別研究」「要望研究課題」とされるものがあった。「準特別研究」は①気象研究所として重点的に研究の推進をはかる必要のあるもの、②近い将来、特別研究として考えられるもの、③経常研究のうち、多額の経費を投入することにより研究が著しく進展すると予想されるもの、④高額な機器の整備を必要とされるものからなり、昭和41年1月に予算配分の能率化をはかるために所内で定められた実行予算配算基準に基づく配分方式である。「要望研究課題」は気象庁からの要望として取り組むものであり、昭和40年に設置された気象庁研究会議に関連し、暫定取扱要領が整備された。

筑波移転前年の昭和54年度気象研究所年報において、経常研究は一般研究として一本化されて報告されている。

昭和42年度から設備整備費及び特別研究費等で整備された大型機器の維持費を計上するため「特殊経費」という項目が設けられ、当該年度は風洞の改修費として2,070千円の予算が

成立した。

経常研究費は昭和 32 年度に 1 億円を超え、昭和 50 年度に初めて 10 億円を超えた。さらに筑波移転前年の昭和 54 年度には 20 億円を超えている。

特別研究としては、「成雨機構の研究」「レーザーによる気象観測法の研究」「地震予知に関する研究」「ロケット及び人工衛星による搭載機器及び超高層大気解析に関する研究」「航空機の航行安全におよぼす悪気象の研究」「梅雨末期の集中豪雨の研究」「地球大気開発計画に基づく総合研究」「大気汚染に関する局地予報法の開発」「大気汚染のための気象観測法の開発」「国際地球内部開発計画に基づく総合研究」「火山噴火予知の研究」「高層気象観測の近代化に関する研究」「気象レーダーエコーディジタル化システムの開発」「MONEX/FGGE 特別観測による熱帯低気圧発生に関する総合研究」「地震予知に関する実験的ならびに理論的研究」等が行われた。

特別予算として昭和 32 年から配布されていた国立機関原子力試験研究費は、昭和 42 年をもって、一旦終了している（昭和 56 年に再開し平成 19 年度をもって終了）。

ウ、昭和 55 年度（1980 年度）～平成 2 年度（1990 年度）

経常研究は筑波移転を行った昭和 55 年度には、①特定研究（特別研究と、他省庁からの移し替え予算）、②準特別研究、③一般研究、④地方共同研究に分類された。翌昭和 56 年度から準特別研究の記述は無くなり、昭和 60 年度までは①特定研究、②一般研究、③地方共同研究に分類された。昭和 61 年度から平成 2 年度の間は、経常研究と地方共同研究は一般研究（経常研究）、一般研究（地方共同研究）と称されている。

この期間の特別研究として「火山噴火現象監視に関する研究」「中層大気の研究」「直下型地震予知の実用化に関する総合研究」「雲及び放射の総合観測手法の研究」「雲の放射過程に関する実験観測及びモデル化の研究」などが行われた。

エ、平成 3 年度（1991 年度）～平成 12 年度（2000 年度）

この期間、一般研究に所内共同研究が加わり、一般研究（経常研究）、一般研究（所内共同研究）、一般研究（地方共同研究）の 3 本立てとなった。

この期間の特別研究として「南関東地域における応力場と地震活動予測に関する研究」（平成 6～10 年度）、「地震発生過程の詳細なモデリングによる東海地震発生の推定精度向上に関する研究」（平成 11～15 年度）等が行われた。

オ、平成 13 年度（2001 年度）～平成 14 年度（2002 年度）

所内共同研究の枠組みが無くなり、①特定研究（特別研究と、他省庁からの移し替え予算）、②一般研究（経常研究、地方共同研究）、③その他（共同研究・共同利用、科学研究費補助金）に分類された。

カ、平成 15 年度（2003 年度）～令和 6 年度（2024 年度）

平成 15 年から、特定研究の区分を取りやめ、特別研究と他省庁予算による研究に明確に分離された。経常研究は平成 16 年度から平成 20 年度は「融合型経常研究」と「一般経常研究」に分けられ、それとは別に特別研究枠（特別研究費による研究、気候変動予測研究費による研究）が設けられた。平成 21 年度からは研究の区分として陽に「特別研究」は明示されなくなり、平成 21～25 年度は「重点研究」と「基礎的・基盤的研究」、平成 26 年～30 年度は「重点研究」

と「一般研究」など、二つの枠組に区別された。令和元年度からは、「基盤技術研究」「課題解決型研究」「地震・津波・火山研究」「応用気象研究」等、研究の目的に応じた分類が行われている。

この頃行われた特別研究として「火山活動評価手法の開発研究」（平成 13～17 年度）、「東海地震の予測精度向上及び東南海・南海地震の発生準備過程の研究」（平成 16～20 年）、「マグマ活動の定量的把握技術の開発とそれに基づく火山活動判定の高度化に関する研究」（平成 18～22 年度）等がある。

（２）他省庁予算による研究

現在、他省庁移し替え予算は、地球環境保全等試験研究費による研究（環境省）、放射能調査研究費による研究（環境省）、研究開発成果の社会実装への橋渡しプログラム（内閣府）がある。他省庁移し替え予算について、かつて気象研究所が活用していたものも含めてその概略を記す。

ア．文部科学省（平成 13 年 1 月以前は文部省、科学技術庁）関係

昭和 35 年度、科学技術庁からの移し替え経費として特別研究促進調整費（特調費）が初めて配布された（昭和 56 年度に科学技術振興調整費が成立するまで毎年継続）。

科学技術庁からの他の経費として、放射能調査研究費が昭和 33 年度に開始され、平成 24 年度まで毎年計上されていた。特別研究促進調整費が昭和 35 年に開始され、昭和 55 年度まで毎年計上されていた。昭和 56 年度から科学技術振興調整費の配算が始まった（科学技術振興調整費は平成 22 年度をもって廃止となった。気象研究所では平成 23、24 年度は科学技術戦略推進費として、平成 25、26 年度は科学技術・学術政策推進費として予算を受け取っている）。

昭和 53 年度から、科学技術庁から海洋開発調査研究促進費を受けることとなった（平成元年度、海洋開発及科学技術調査研究促進費に予算科目を変更し、平成 16 年度をもって終了した）。

平成 25 年度から、それまで文部科学省から配算されていた放射能調査研究費が、環境省から配算されることとなった。そのため、科学技術・学術政策推進費課題「気候変動に伴う極端気象に強い都市創り」が終了した平成 26 年度を最後に、文部科学省からの移し替え予算は無くなっている。

イ．環境省（平成 13 年 1 月以前は環境庁）関係

昭和 47 年から公害防止などに関する研究経費は環境庁に一本化されることとなり、同庁より国立機関公害防止等試験研究費及び環境保全総合調査研究促進調整費の移し替えが行われることとなった。平成元年度をもって国立機関公害防止等試験研究費が終了し、平成 2 年度から地球環境研究総合推進費を受けることとなった。

昭和 56 年度、国立機関原子力試験研究費（昭和 42 年度までは運輸省予算）が再開され、以後平成 15 年度まで継続した。放射能調査研究費を平成 25 年度から受けており、研究を令和 5 年度まで実施していた。

ウ．国土庁（昭和 49 年 6 月以前は経済企画庁）関係

昭和 47 年度、経済企画庁から、新全国総合開発計画及びその周辺の大気環境保全に必要な

気象調査のため、国土総合開発事業調整費が配布され、昭和 51 年度まで継続した。

エ. 内閣府

平成 30 年度から令和 4 年度まで、内閣府の官民研究開発投資拡大プログラム (PRISM) による予算での研究を実施し、令和 5 年度からは研究開発と Society5.0 との橋渡しプログラム (BRIDGE) による研究を実施している。

4. 組織の変遷

ここでははじめに「気象百年史」に記されている昭和 49 年までの変遷を大まかに記し、その後の研究所を取り巻く状況の変化と、組織のあゆみをたどる。

(1) 昭和 17 年 (1942 年) ～昭和 49 年 (1974 年)

気象研究所の歴史は、気象庁の前身である中央气象台に昭和 17 年に設置された研究課に始まる。その後、昭和 21 年 2 月 1 日に、東京都杉並区高円寺の旧陸軍気象部跡に中央气象台研究部が発足し、この日をもって気象研究所の創立と定めている。発足当初には庶務課及び 10 研究室が置かれた (理論気象研究室、気象物理研究室、高層気象研究室、予報研究室、衛生気象研究室、気象化学研究室、海洋研究室、地殻物理研究室、測器研究室、電磁研究室)。翌昭和 22 年 4 月、気象研究所に改組された。その際、予報研究室、海洋研究室が廃止され、農工気象などの研究を分掌する応用気象研究室が設けられた。また、工作課が設置され、工作課内部に測器工場が附置された。

昭和 24 年 11 月、内部組織の改正により、総務課と 7 研究室が置かれた (予報研究室、高層気象研究室、測器研究室、物理気象研究室、地球化学研究室、応用気象研究室、地球電磁気研究室)。

昭和 27 年 8 月、地震研究室と海洋研究室が増設された。

その後、いくつかの組織改編の後、昭和 31 年 7 月、中央气象台が運輸省外局として気象庁となったことに伴い、気象業務に関する技術に関する研究を行う機関として、気象庁の附属機関となり、総務課と 9 研究部 23 研究室が置かれた (予報研究部、高層気象研究部、物理気象研究部、応用気象研究部、気象測器研究部、地震研究部、海洋研究部、地球電磁気研究部、地球化学研究部)。

昭和 33 年 10 月、3 課 (総務課、会計課、研究業務課) からなる総務部が設置された。

昭和 34 年 9 月に甚大な被害をもたらした伊勢湾台風を契機に、昭和 35 年 4 月、高層気象研究部が台風研究部 (3 研究室) となった。また地球電磁気研究部が高層物理研究部 (4 研究室) に改められた。

昭和 46 年 4 月、気象衛星計画に伴い気象測器研究部が気象衛星研究部に改められた。

昭和 47 年 5 月、総務部研究業務課が廃止され、所長直属となる企画室 (企画・管理・調査の 3 係、及び補佐官・外事官を設置) が新設された。また、この月、気象研究所の筑波研究学園都市への移転が決定した。

昭和 49 年 4 月、地震・火山噴火予知の要請に対処するため、地震研究部が地震火山研究部に改められ、津波観測に用いる測器の研究が分掌に加えられた。

(2) 昭和 50 年 (1975 年) ～昭和 59 年 (1984 年)

昭和 55 年 6 月、筑波研究学園都市の新庁舎へ移転し、大型電子計算機、ドップラーレーダー、風洞装置、ライダー等の施設が導入・更新された。大型電子計算機の運用に関する業務を分掌するため、企画室に業務係が置かれた。

昭和 58 年 10 月、地震火山研究部に 1 研究室が加わり、全部で 4 研究室となった。さらに昭和 59 年 10 月、直下型地震発生予知に関する研究の拡充で 1 研究室が加わり、5 研究室となった。

(3) 昭和 60 年 (1985 年) ～平成 6 年 (1994 年)

昭和 62 年 5 月、世界各地で頻発する異常気象に対し、そのメカニズムの解明を目的として効率的な研究体制の確立を図るため、高層物理研究部が廃止され、同研究部の 2 研究室と予報研究部の 1 研究室が合併し、気候研究部が新設された。また、静止気象衛星システムの発展、気象観測のシステム化・自動化に関する研究を目的として、気象衛星研究部は気象の観測システムに関する研究を分掌する気象衛星・観測システム研究部に改組された。

平成 3 年 10 月、地球温暖化予測の高度化に関する研究促進のため、気候研究部第四研究室を設置した。

(4) 平成 7 年 (1995 年) ～平成 16 年 (2004 年)

平成 8 年、「地球温暖化予測の高度化に関する研究」時限定員の 4 年間の再延長が認められた。

平成 9 年、応用気象研究部が環境・応用気象研究部に名称変更、台風研究部第二研究室が気候研究部第五研究室に、物理気象研究部の第三研究室が、環境・応用気象研究部の第四研究室に振替られた。

平成 9 年 12 月 3 日の行政改革会議最終報告で、気象研究所は引き続き気象庁に付属する研究所として認められ、平成 10 年 6 月には中央省庁等改革基本法が成立した。平成 11 年 1 月 26 日、21 世紀の中央省庁のあり方を描いた中央省庁等改革に係る大綱が取りまとめられ、その中で、平成 13 年 1 月に、気象庁は国土交通省の外局として「気象業務の健全な発達を図ることを任務」としてスタートし、気象研究所は「気象業務に関する技術に関する研究」を行う気象庁の施設等機関として存続することが決定した。

平成 13 年 11 月、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」が策定された。その目的として、「科学技術振興のため、研究者を励まし、優れた研究開発活動を奨励して行くとの観点をもって適切な評価を実施することで、研究開発活動の効率化・活性化を図り、より優れた研究開発成果の獲得、優れた研究者の養成を推進し、社会・経済への還元等を図るとともに、国民に対して説明責任を果たすことができる。」と謳われ、従来の研究開発課題と研究開発機関とともに、研究開発施策や研究者などの業績が評価の対象に加えられた。これを受け、平成 14 年度には企画室内に評価係長が置かれることとなった。さらに平成 15 年 4 月には、研究評価官が企画室に配置された。

(5) 平成 17 年 (2005 年) ～平成 26 年 (2014 年)

平成 18 年 6 月「国の行政機関の定員の純減について」が閣議決定され、気象研究所は平成 21 年度に「非公務員型の独立行政法人」となることとなった。円滑な移行を図るため、所内に独立行政法人移行実施本部を設置し、種々の検討・作業を進めた。

独立行政法人気象研究所法案が平成 20 年通常国会（第 169 回国会）に提出されたが継続審議となり、次の臨時国会（第 170 回国会）で廃案となった。さらに、施行期日を平成 22 年 1 月 1 日とする新たな独立行政法人気象研究所法案が平成 21 年通常国会（第 171 回国会）に提出されたが、衆議院の解散に伴って廃案となった。その後、平成 21 年 12 月 25 日の閣議決定「独立行政法人の抜本的な見直しについて」により法人化は見送りとなった。

平成 22 年度の研究計画では、独立行政法人化計画の見送りを受けて、平成 21 年度開始の中期研究計画の見直しを行い、「台風・集中豪雨」、「地震・火山・津波」、「気候変動・地球環境」の 3 つの分野に重点をおいて研究を行い、観測・実験、データ解析、モデル開発を融合的に進めることとなった。

平成 25 年 5 月、研究部横断的な研究を推進する体制を強化すべく、研究総務官、研究調整官を新設した。物理気象研究部、海洋研究部及び地球化学研究部を廃止し、海洋・地球化学研究部を新設した。

平成 26 年 4 月、新しい中期研究計画の開始に伴い、地震火山研究部が廃止され、地震津波研究部と火山研究部が新設された。

（6）平成 27 年（2015 年）～令和 6 年（2024 年）

平成 26 年御嶽山噴火による災害を受け、気象庁は火山観測施設の増強をはじめとする観測体制の強化に加え、平成 28 年度には、火山監視・情報センターを強化して、本庁に「火山監視・警報センター」、札幌、仙台、福岡の各管区気象台に「地域火山監視・警報センター」を設置、大幅な増員を行うなど、組織体制の強化を進めた。気象研究所も、平成 28 年 4 月、火山研究部を増員して、これまでほとんど行ってこなかった火山ガス観測による火山活動監視・予測に関する研究を推進するための第三研究室（定員 3 名）を新たに設置するとともに、従来からの地球物理学的手法による火山活動評価・予測の高度化の研究を行っている第一研究室を、各火山監視・警報センターに研究官が駐在するという体制をとることを理由として増員した。

第一研究室の増員は、各火山監視・警報センターに分室を設置して研究官が駐在するという体制をとるためのものであり、この体制は地元大学と連携して各火山の特徴を踏まえた研究を進めるとともに、現場の声を聴きながら火山活動の評価の精緻化等現業業務に資する研究を実施することを目的としていた。

平成 31 年 4 月開始の中期研究計画では、気象・気候分野においては、観測・予測技術の基盤を強化するためにモデリング技術を軸に研究開発を進める基盤技術研究、基盤技術を基に自然災害や地球温暖化などの課題に取り組む課題解決型研究、関係分野とも連携しつつ、データの利活用をシームレスに推進する応用気象研究という新しい枠組みにより、研究計画を進めていくこととなった。そのため、研究組織の見直しを行い、予報研究部、気候研究部、台風研究部、環境・応用気象研究部、気象衛星・観測システム研究部、海洋・地球化学研究部を廃止し、全球大気海洋研究部、気象予報研究部、気象観測研究部、台風・災害気象研究部、気候・環境研究部、応用気象研究部が新設された。

線状降水帯に伴う豪雨による甚大な災害の頻発により、その予測精度向上等に向けた取組の加速・強化が喫緊の課題となった。気象研究所では緊急研究「集中観測等による線状降水帯の機構解明研究」（令和 3～4 年度）を実施した。令和 4 年 4 月には、「線状降水帯に関する研

究連携体制の強化」のため、研究調整官の所掌事務の変更により研究連携戦略官が設置された。

5. 評価の枠組みの変遷

昭和期の気象研究所では、所属長の意見を添えて研究報告書を気象庁長官に提出する、いわゆる内部評価を行っていた。

平成元年2月には、気象研究所部長会議規則第7条が改正されて、気象研究所研究評価実施要領が制定され、さらに同要領に基づいた評価の項目及び手法を明示した研究評価フォーマットが定められ、各課題について評価が実施された。平成元年12月には気象研究所評価制度が発足した。

平成4年度に「科学技術に関する行政監察結果に基づく勧告」が行われ、この中では、限られた時間と研究開発資源の下に、より効果的に研究開発を進めるための合理的な研究評価が重要であると指摘しており、研究機関内部の評価能力を補完する手段として、外部の有識者による評価等の多様な対応を図ること等が指摘された。

これを受け、平成7年度からは所全体の活動を評価してその方向性を調整、決定することを目的として、外部有識者による評価を実施することにし、同年12月に気象研究所評議委員会が設置された。気象研究所長に対し「気象研究所の長期研究計画の策定に関する助言」及び「気象研究所が実施する研究課題の評価に関する報告」を行うこととされている。また、研究課題に対する外部評価を実施するため、評価対象となる研究の分野にあわせ、評議委員の中から「評価分科会」の委員を選出して外部評価を実施することとした。平成8年3月、第1回気象研究所評議委員会が開催された。評議委員会委員は、気象、地震、海洋の専門分野に加え、ジャーナリストなどの有識者十数名から構成された。

平成11年度は運輸省研究機関等評価が行われ、気象研究所の運営全般について幅広い評価を受けた。

平成13年11月、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」が策定された。これを受け、企画室内に評価係長が置かれることとなった。さらに平成15年4月には、研究評価官が企画室に配置された。

平成17年4月には気象研究所評価実施規則、平成21年9月には気象研究所評議委員会設置規則が制定された。

6. 広報活動等の変遷

防災情報の理解と普及を図るために、国民向けに分かりやすく研究・技術開発情報の発信と知識の普及活動を行っている。

(1) 気象研究所研究討論会

昭和41年12月、第1回研究討論会が開催された。以後昭和43年3月まで10回開催した。

(2) 気象研究所研究成果発表会

昭和56年11月、第1回目となる昭和56年研究発表会を開催し、平成15年から研究成果発表会に名前を変えて毎年開催している。なお、平成15年11月には、気象研究所の研究活動や研究成果を広く社会一般の方々に理解してもらうことを目的として、気象研究所研究活動

報告会を当時の気象庁講堂にて開催した。この研究活動報告会は、平成 21 年までは当時の気象庁講堂で開催されていたものの、研究成果発表会に統合されることとなった。

(3) 気象研究所一般公開

昭和 35 年に科学技術週間が閣議により制定された。毎年 4 月 18 日（発明の日）を含む 1 週間を科学技術週間と呼び、科学技術庁（平成 13 年以降は文部科学省）の呼びかけのもと、全国各地で関連する行事が実施される。当所においては、昭和 40 年から科学技術祭として開催され、昭和 42 年からは科学技術週間の一環として一般公開を実施した。筑波移転後も引き続き実施している（令和 2 ～ 4 年は新型コロナウイルス感染症の影響により中止された）。

(4) 気象研究所のお天気フェア

昭和 58 年からつくば地域との交流のため職員有志による気象教室が行われていた。平成 2 年 8 月、筑波三官署有志実行委員会が気象教室を開催し、講演・見学・天気図講習会等を行った。平成 4 年に気象庁の呼びかけのもと「気象の知識の普及と気象業務への理解を深めるとともに、気象業務に対する国民の声を広く捉え業務に反映させる」をスローガンに、各管区、海洋気象台・地方気象台等の所在地において 7 月下旬から 8 月中旬にかけて組織的に「お天気フェア」を実施することとなり、これを受け、気象研究所・高層気象台・気象測器工場の 3 機関共催という形で実施することとなった。令和 2 ～ 4 年度は新型コロナウイルス感染症の影響でオンライン配信となったが、令和 5 年度は数値予報開発センターを加えた筑波 4 官署による現地開催を行った。

(5) 気象研究所ホームページ

平成 7 年 12 月に、気象研究所の研究活動や内容を内外に向けて積極的に発信することを目的として、気象研究所ホームページの公開を開始した。

平成 15 年 7 月に、研究所の活動を積極的に内外に情報発信すると同時に、国民に対するアカウントビリティの向上を図ることを目的として、全面的な見直しを行った。見直しにあたっては、所内にホームページ改定ワーキンググループを設け、日本語と英語のホームページを実現した。研究の紹介、施設の紹介、人事等の公募の掲載、入札情報等の掲載、研究評価の概要、気象研究所技術報告を含む刊行物の pdf 版の公開など、内容を充実させた。

平成 31 年 4 月に、気象研究所組織改編実行プロジェクトの一環として、ホームページの再度の見直しを実施した。

現在は、気象研究所の研究や研究者の情報、研究成果報告会等の紹介など、分かりやすく提供していると同時に、適宜、ニュース、人事や会計的なお知らせなどの運営上の機能を含め、公開している。

7. 筑波研究学園都市への移転

(1) 昭和 36 年（1961 年）の移転構想から昭和 47 年（1972 年）の移転決定まで

昭和 36 年 9 月、政府は「官庁の移転について」を閣議決定した。首都への人口過度集中防止のため機能上必ずしも東京都の既成市街地に置くことを要しない官庁（付属機関及び国立の学校を含む）の集団移転について検討する、というものであった。

昭和 38 年 9 月 10 日には「研究学園都市の建設について」を閣議了解、研究学園都市の建

設地が筑波地区と決定された。9月21日には首都圏整備委員会事務局長と行政管理庁事務次官の連名で「研究学園都市に移転する機関の選定について」との文書が各省事務次官宛て発送され、気象研究所は28日に「筑波地区への移転も止むを得ない」との回答を行っている。

昭和39年7～8月、首都圏整備委員会・建設省・科学技術庁が共同で各省庁の用地面積の調整、積算が行われ、気象研究所からも移転時期を昭和47年、人員247名、所要総面積30万2,000m²の案を提出した。

昭和40年2月、気象研究所では移転問題調査委員会を発足させ、移転問題について検討が行われた。職員に不安と、反対の声が強く、同委員会は4月、所長に対し「気象研究所が気象庁の所在地を離れて移転するのは不適當である」との答申を行った。理由として、他研究機関・大学等との連絡交流の困難、そのための研究効率の低下、給与・生活条件の低下、優秀な研究者の確保困難、移転中の研究の中断、移転困難者の問題があげられている。同年6月、所長は長官宛てに「筑波地区への移転は不適當であるとの結論に達したので再検討の上、善処をお願いします」との文書を上申した。

昭和42年8月5日付の総理府総務副長官、行政管理庁事務次官、首都圏整備委員会事務局長の連名による「筑波研究学園都市に移転する機関についての再調査」に、気象庁は「移転する機関はなし」と回答。9月5日閣議了解された移転予定36機関の中には気象庁関係は含まれなかった。

昭和45年5月、筑波研究学園都市建設法が制定公布され、6月に気象研究所は「研究学園都市移転についての意見」を本庁にあげ、移転に必ずしも反対するものでないことを意思表示した。

昭和46年秋には筑波移転を前提に大型施設予算要求作業が進められ、11月15日には「筑波研究学園都市移転に伴う要望事項」を本庁に提出した。11月27日、気象研究所と気象測器工場の筑波移転が気象庁の庁議で決定された。

昭和47年5月の閣議では筑波研究学園都市に建設する気象研究所、高層気象台、気象測器工場を含む42の研究、教育機関等が正式に決定された。

(2) 昭和47年(1972年)～昭和51年(1976年)の移転準備

昭和47年6月、気象研究所は移転計画書策定作業を行い、8月に長官、次長、総務部長の来所を得て、研究室長以上が出席して筑波移転に関する打ち合わせを実施した。9月には所長を委員長とする移転建設委員会及び下部組織として各種部会を設置し、移転に関する諸問題の検討と決定をすることになった。また同年11月にも長官から職員に対する説明会を行った。

昭和48年1月には移転準備室が発足した。

研究所における各種の問題の検討は予算の要求順序とほぼ対応して行われた。はじめは本館の基本設計、次は研究施設の検討がなされた。このうち電子計算機の要求に関してはユーザーの数が多いこと、筑波移転の目玉であったことから大きな議論となった。その後宿舍及び生活環境に関することが問題となった。移転困難者は移転決定当初から問題になっていたが、その解決は移転直前まで持ち越された。

昭和48年度予算で鉄塔建設が認められ、昭和49～50年度は共同受電設備、昭和51年度に本館建設の予算が成立し、移転の準備が本格的に始まった。

(3) 昭和 51 年 (1976 年) ~ 昭和 55 年 (1980 年) の本館、別棟及び研究施設の建設

昭和 51 年度に本館建設予算 (3 年計画 34 億円、建物面積内示は、1 万 7,522m²) が成立した。移転建設委員会及び本館レイアウト部会で各部門からの実行要求面積を検討した結果、居住区である研究室及び事務室を重視して全体面積を 1 万 6,646m²、そのうち実験室等は 5,600m² 程度とした。実験室等の面積は最終的には 5,664m² に決まった。また研究室、事務室、輪講室の間仕切りは各研究部の裁量に任せること、部長室は個室で 1 単位とすることとなった。

昭和 52 年 2 月、3 月に建築及び設備の入札、契約が行われ、3 月 15 日に起工式、昭和 54 年 3 月には地下 1 階、地上 6 階、屋上 2 階、建物延べ面積 1 万 7,225m² の本館が完成した。

別棟に関しては、昭和 52 年、本館関連の作業が終了後に別棟の予算要求と基本設計に関連して別棟関係基本計画の見直しが行われた。昭和 52 年度補正予算では器材庫、車庫、観測車庫、自転車置場を先行して建設することが認められた。

昭和 53 年度には気象風洞回転実験棟、宇宙線ロケット気球センサー実験棟及び実験廃水処理施設の予算が成立し、昭和 54 年度には露場実験棟、放射実験棟、エーロゾル実験棟及び低温実験棟、昭和 55 年度には地震重力観測棟及び放射能観測棟の予算が成立した。

(4) 昭和 55 年 (1980 年)、移転

移転作業は昭和 55 年 2 月に始まり、その後高円寺の旧施設の撤去等を進め、昭和 56 年度に若干の研究施設を要求することを除き昭和 55 年 6 月 30 日に移転が完了した。

自然豊かな田園地帯に、高円寺時代の約 15 倍の敷地面積 30 万 m²、建物面積 2 万 2,000m² という余裕ある環境に技術の粋を集めた高度の研究施設が完成した。庁舎の新築、大型施設の完成、電子計算機の導入によって高円寺時代の研究環境に関する懸案が解決し、昭和 54 年には経常研究費のランクアップが認められた。また、移転後は他省庁予算の増加、各国の研究者の来訪、滞在、筑波大学連携大学院との協力、科学技術庁フェロー及び科学技術特別研究員の受け入れなど、外部との連携が拡充した。

また、筑波移転は施設整備・拡充の絶好の機会であった。各研究部、企画室、総務部も含め全所的に電子計算機システム、気象レーダー、大型気象風洞装置、低温実験施設、ライダー、電子顕微鏡、気象観測用鉄塔等、施設整備・拡充に取り組んだ。

8. 主な研究設備

昭和 55 年の筑波移転時以降、様々な大型研究施設や実験装置が導入され、従来の研究の効率化を図るとともに、研究の新局面が切り開かれてきた。それらのうちの主な施設を紹介する。

(1) 電子計算機システム

高円寺時代の気象研究所には、昭和 48 年に設置された使用時間の制限付きの本庁電子計算室 I/O 端末があった。

筑波移転に合わせ、より使い勝手のよい計算設備の実現に向けて予算要求を行い、昭和 54 年度予算において大型電子計算機の整備が正式に承認された。各研究部から出されている利用計画を満たすために必要な計算機資源の手当として、年々の標準予算として約 5 億円が認められた。これは当時の気象研究所全体の予算の約四分の一であった。昭和 55 年に運用が開始された初号機から 8 代にわたって更新し、令和 6 年度には気象庁大型計算機 (NAPS11) と

の統合・一体運用が開始された。

電子計算機システムを用いて、高い解像度の精緻な数値予報モデルの開発や地球温暖化予測に関する研究や、地震津波火山分野での解析・予測技術の研究などに利用している。

(2) 気象レーダー

筑波移転前、気象研究所には昭和 28 年度製作の気象レーダー、昭和 39、40 年度製作のドップラーレーダー、昭和 35 年度製作のミリ波レーダー等があった。これらのレーダーは既に老朽化しており、維持が困難となっていた。またドップラーレーダーを除きデータの出力がアナログ方式であったため、解析に非常に労力を要するものであった。そこで筑波移転を機にこれら 3 台のレーダーを更新した。この時に整備された移動型ドップラーレーダーはその後我が国で普及した移動型ドップラーレーダーの 1 号機であった。

平成 20 年には、総務省が周波数資源の有効利用を目的に気象レーダーの狭帯域化を実証するために開発した C バンド固体素子二重偏波レーダーが、気象研究所の気象ドップラーレーダーの後継として移管されて実験的な運用が開始され、実用化のための技術上の問題の解決と、シビア現象の監視及び危険度診断技術の高度化に関する研究のための観測が行われた。ここで得られた知見は、平成 28 年のレーダーの狭帯域化技術の研究開発及び気象庁空港気象ドップラーレーダーの固体素子二重偏波化更新に貢献した。また令和 2 年以降の気象庁一般気象レーダーの固体素子二重偏波化に役立てられることとなった。

平成 27 年、気象研究所において X バンド単偏波フェーズドアレイ気象レーダーの研究運用を開始した。半径 60km 圏内の 3 次元空間を 30 秒ごとの高い頻度で隙間なく観測することにより、局地的大雨や竜巻等突風など、激しい風雨をもたらす顕著現象のきめ細かな理解が可能となった。気象研究所では当該レーダーを多様な気象場において運用し、レーダーの性能評価やデータ処理技術の開発を進めるとともに、将来的な監視・予測技術の高度化に関する研究を実施した。フェーズドアレイ気象レーダーによる高頻度・高解像度の観測データの解析により、令和元年度東日本台風に伴う竜巻の発生メカニズムが明らかになる等、科学的成果が得られている。

(3) 大型気象風洞装置

筑波移転前、気象研究所物理気象研究部（中野分室）には陸軍気象部から譲り受けた大型風洞装置と、伊勢湾台風に関連して建設された回転実験台があった。研究所の筑波移転に伴って風洞を更新することになった。

風洞完成後は、地形性乱流やビル風の研究、大気拡散研究など幅広く基礎的研究を行う一方、本州四国連絡橋周辺の海峡風の研究、余部鉄橋列車転落事故に関する鉄橋周辺の気流特性の調査、気象官署における風観測環境の基準化など実用的な問題についても調査研究が行われてきた。また、昭和 62 年にはそれまでの風洞実験結果をまとめて「気流と拡散に関する風洞実験資料」として刊行されている。

近年においては、小型気象風洞実験装置や回転実験装置も含め、気象予報モデル境界層過程の高度化を目的とした乱流に関する基礎的実験に重心が移っている。令和 3 年度補正予算をもとに、大型気象風洞装置の強化が図られ、令和 5 年度にかけて、更なる活用を見据えて大型気象風洞実験装置と回転実験装置の機能強化工事が実施された。

(4) 低温実験施設

筑波移転後、大型施設の一つとして、昭和 55 年 3 月に低温実験棟が完成した。当時は性能の異なる二つの低温室（それぞれ -30°C と -40°C まで冷却可）が整備された。垂直風洞を使用した雪片等の成長実験、噴霧器を併用した気象測器等の低温性能・改良試験などに利用してきた。平成 13 年度補正予算により低温実験施設が更新され、同じ場所で平成 16 年 3 月に完成した。性能の異なる二つの低温室（それぞれ -40°C と -90°C まで冷却可）のほか、実験空間内の気温と気圧を同時制御しながら雲生成過程を調べる減圧低温試験槽（雲生成チェンバー）が整備された。2000 年代後半以降、各低温室は主に気象測器等の低温性能試験に利用し、雲生成チェンバーは経常研究及びそれに資する各研究プロジェクトにて、雲生成過程の室内実験的研究で広く利用し、数値実験や野外観測と併せてエーロゾル-雲相互作用に関する研究を進めている。

(5) ライダー

我が国の気象用ライダーの発端は昭和 42 年前後に遡る。気象研究所では、昭和 40 年代後半に研究を開始し、主にエーロゾルやオゾン、水蒸気の観測技術の開発が進められている。

エーロゾルの観測についてまず記述する。昭和 45～54 年当時、大気汚染が甚だしく、政府も特別調査観測等の対策を実施することになった。その一つとして、対流圏、特に下層を主目標とするライダーが必要になり日本気象協会と協力してその開発に努めた。レーザーの波長は 1.06 ミクロンと長いので、第 2 高調波（0.532 ミクロン）も観測できるようにした。受信には直径 50cm の反射望遠鏡を用いた。この走査観測型のライダーは、世界で最初のものであったようである。

十数年間に世界で火山の大噴火が数回起こり、大噴火の気候への影響を調べる上で成層圏の観測は極めて重要で、これが可能なライダー施設を作ることが次の目標であった。昭和 53 年度から高出力レーザーライダーの設計と観測、解析方法の開発が行われ、筑波移転時に上述の実績で成層圏観測用ライダーの整備が認められた。移転直後の昭和 55 年、北米セントヘレンズ火山の大噴火があり、成層圏噴煙流を観測で確認でき、続いて昭和 57 年、中米エルチチョン火山の大噴煙流の観測にも成功して、それらの観測結果を社会に発信した。平成 3 年 6 月のピナトゥボ火山噴火では、噴火から数年間にわたる成層圏エーロゾルの移流拡散、変質等の動態の把握、その気候への影響の解明に寄与することができた。オゾン層の監視については、昭和 63 年、成層圏オゾン観測用のライダーを開発して観測を行うとともに、平成 3 年度からは成層圏オゾンの現象に関係する極成層圏雲をカナダ北極圏ユーレカで観測し、オゾン減少を引き起こす雲を捉えた。平成 29 年度には高度 10km まで高精度の観測が可能な対流圏オゾンライダーの開発に成功した。

平成 12 年度に水蒸気ラマンライダーの開発が始まり、平成 30 年度に戦略的イノベーション創造プログラム第 II 期に参加して、九州の野母崎と甕島で水蒸気ライダー観測を実施し、九州の自治体と共同で予測精度の向上を目指した実証実験の成果として、線状降水帯発生時には下層の水蒸気量が増加することを実観測により初めて明らかにした。令和 3 年度には気象研究所緊急研究「集中観測等による線状降水帯の機構解明研究」に参加し、野母崎と甕島でラマンライダーを用いた水蒸気観測を実施し、線状降水帯の発生との関わりやデータ同化に用いた

ときの下層水蒸気量のインパクトを報告した。

(6) 電子顕微鏡

気象学、特に雲物理をはじめ応用気象学、大気化学の分野において、電子顕微鏡は大気エアロゾル粒子・雲核・氷晶核などの形態観察、元素分析及び微小領域の結晶構造解析になくてはならない施設であり、気象研究所では昭和32年3月から整備している。

気象研究所の筑波移転により、昭和56年3月に最大倍率80万倍の透過型電子顕微鏡に更新された。昭和63年2月、標準X線検出器とエネルギー分散型X線分析器を更新整備し、原子番号6（炭素）以上の元素の分析が可能となった。平成23年度に後継機に更新し、自動多点組成分析機能を備えるなど、エアロゾル分析に特化した装置として、国内外の多くのエアロゾル研究に貢献している。平成4年2月、走査型電子顕微鏡を整備し、フィルター上に採集された粒子の分析等、電子線が透過不可能で大きいサイズの試料分析に活用している。この電子顕微鏡に標準X線検出器を付属させ、X線微小部分分析が行えるようにするとともに、画像処理装置と画像出力装置を平成7年3月にかけて設置した。この装置により、低真空型で前処理なく簡易に環境試料を分析することが可能となった。これらの装置を用いた研究により、エアロゾルの個別粒子単位での混合状態、組成情報、大気化学反応などが明らかにされている。

(7) 気象観測用鉄塔

筑波移転を機に、大気下層における風、気温、湿度等を詳細に観測しその構造を明らかにする、気象学上重要な運動エネルギーや運動量、熱などの輸送のメカニズムを明らかにする、高層建築物や構造物の設計に必要な資料を提供するなどのために観測用鉄塔を建設することが計画された。昭和48年度から工事が開始され、鉄塔本体は昭和49年度末に完成した。観測器材は昭和51～52年度の2年間で整備された。鉄塔の全長は213m、測定器の感部は10m、25m、50m、100m、150m、及び200mの高度に3方向に長さ約6mのアームを設置して取り付けられた。観測データは近隣にある資源環境総合技術研究所（現 産業技術総合研究所）や国立環境研究所など、多くの研究者たちが利用した。紅白に塗り分けられ航空障害灯が明滅する鉄塔は、筑波研究学園都市のランドマークとも呼ばれた。

観測成果をもとに昭和57年7月には第1回 Tower Meteorology シンポジウムが開かれたのをはじめ、昭和58年気象学会春季大会シンポジウム「大気境界層について—タワーと風洞に関連して」においてそれまでの鉄塔観測の成果について報告された。

平成22年、完成から30年余の歳月が経ち、鉄塔本体が老朽化したこと、新しい観測技術の確立により鉄塔観測の必要性が相対的に低くなってきたことから、鉄塔の解体が決定し、平成23年6月に、36年の歴史に幕を下ろした。

(8) ウィンドプロファイラ

大気からの電波反射を利用して上空の風向風速を連続的に観測可能な新しい装置であるUHF帯のウィンドプロファイラが、昭和63年に導入された（昭和62年度の補正予算）。仕様では、使用周波数404.37MHz（波長約75cm）で、対流圏から成層圏下部までを高い高度分解能で観測できた。しかし、実用的なデータを得られるようにするためには、アンテナ等ハード面での改良、観測データ処理手法の開発など、プロファイラ測定システム全般についての研究が必要であった。また、実用化に向けては、気象庁と共同で業務実験も行われた。このウィ

ンドプロファイラ及び後継のより短波長のプロファイラである境界層レーダーを用いた研究成果と業務実験の成果は、気象庁による平成 13 年のウィンドプロファイラ観測網（局地的気象監視システム）の導入につながった。上空の風向・風速の連続的な変化の様子がよりわかるようになり、大気現象の予測精度向上に貢献している。

9. 表彰からみた研究成果

気象研究所は創立以来数多くの業務貢献と、学術成果を創出してきた。それに伴い多くの表彰をいただいており、「気象百年史」が編纂された昭和 50 年以降では、内閣総理大臣賞（海洋立国推進功労者表彰）1 件、文部科学大臣表彰科学技術賞 4 件、気象庁長官表彰 26 件、その他、日本気象学会などの各種学術学会から数々の賞を受賞している。また、平成 19 年にノーベル平和賞を受賞した IPCC より、平成 20 年 4 月に気象研究所に感謝状が授与された。

【第 2 節】全球大気海洋研究部

全球大気海洋研究部は、気象研究所の組織再編により、気象業務に共通する幹や根となる技術基盤としての数値モデル開発を行う部門として、平成 31 年 4 月に設立された。その前身である気候研究部、環境・応用気象研究部、海洋・地球化学研究部で行われていたモデルの各要素技術を集約することにより、有機的な開発を行うことを目指している。全球大気海洋研究部は、地球全体に係る気象、地象、地動、地球磁気及び水象並びにこれらに関連する輻射に関する研究を所掌している。第一研究室は地球全体に係る気象の予報及び気象と水象の相互作用、第二研究室は地球全体に係る週間天気予報及び季節予報、第三研究室は地球的規模の気象及びこれに関する輻射、第四研究室は水象、第五研究室は水象に関する観測法及び水象に関する気象測器の研究を分掌している。

気象研究所の経常研究では、モデリング技術を軸に研究開発を進める基盤技術研究の一環を担い、大気・海洋・化学輸送、温暖化予測の各モデル（及びそれらの同化システム）を、次世代のモデルとして地球システムの観点で開発している。様々なモデル開発を統合して行う地球システムモデルや大気海洋結合データ同化システムについては、将来の予測のシームレス化を見据えて重要なテーマとして取り組んでいる。当研究部が扱う経常研究課題は 5 つの副課題から構成され、それぞれ地球システムモデル、海洋予測技術、海洋観測・海洋データ同化、季節予測システム、化学輸送モデルに関する研究を行っている。

1. 地球システムモデルの開発

大気モデルを日々の天気予報のためばかりでなく、季節から 100 年スケールの大気現象の特徴を捉え、その変化の予測も可能となる気候モデルへと発展させるための研究は、昭和 48 年からの予報研究部による経常研究「大気大循環モデルの開発」で口火を切り、その後の昭和 53 年からの「大気大循環の数値実験」へと続いた。気象研究所筑波移転から自前の計算機が使用できるようになり、昭和 59 年には気候研究部が発足して、気候モデル開発は加速した。昭和 58 年開始の「数値モデルによる大気大循環の研究」、昭和 63 年の「気候モデルの開発」、平成 5 年の「モデルによる気候変動の基礎的研究」、平成 6 年の「エルニーニョ予測モデルの

開発」(所内共同研究)と研究が進められ、この間に気候モデルは大気モデル単体から大気海洋結合モデル(MRI-CGCM1)へと高度化した。

同時期に世界では、昭和63年(1988年)の世界気象機関(WMO)と国連環境計画(UNEP)が合同で設立した気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の活動が始まり、地球温暖化のメカニズム解明に向けたモデル開発研究が国際的に進められるようになっていた。このような状況の中で、初期の気象研大気大循環モデル(MRI-AGCM1)に海洋混合層モデルを結合して行われた実験で得られた成果がIPCCの第一次評価報告書(平成2年(1990年))に反映された。これ以降、最近の第六次評価報告書(令和3年(2021年))に至るまで、当研究所のIPCCへの途切れない貢献は継続されている。平成3年(1991年)には、気候研究部の中に地球温暖化研究を専門とする研究室が新設され、地球規模の長期気候変動を対象とした気象研究所での気候モデル開発体制が強化された。

IPCCの活動を支援するために、世界気候研究計画(WCRP)は、平成7年(1995年)に結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP)を開始した。同研究部も、開発する気候モデルの国際標準化を狙って、積極的にCMIPに参加してきた。さらに、平成6年に開始された外部資金による「高精度大気海洋結合モデルによるENSOの機構解明に関する研究」(海洋開発及地球科学技術調査研究促進費)、「熱帯林の変動とその影響等に関する観測研究」(海洋開発及地球科学技術調査研究促進費)、「砂漠化機構の解明に関する国際共同研究」(科学技術振興調整費)に参加し、気候変動の実態解明に向けた研究に精力的に取り組んだ。平成15年からの「気候システムとその変動特性のモデルによる研究」では、気候モデルに陸地圏、雪氷圏、生物圏などに関わるモデルコンポーネントを新たに導入するモデル開発に向かって舵が切られた。

平成17年度からの「温暖化による日本付近の詳細な気候変化予測に関する研究」(特別研究)を端緒として、所内関係部署の協力の下で、海洋モデル(MRI.COM)、エーロゾルモデル(MASINGAR)、大気化学モデル(MRI-CCM)などのコンポーネントモデルを開発して大気モデルと結合し、大気と海洋の大循環に加え地球の物質循環とそれらの間の相互作用をも表現する地球システムモデルの開発が進められた。各コンポーネントを結合するためのカップラー(Scup)も独自に開発した。その結果、平成22年からの「気候変動への適応策策定に資するための気候・環境変化予測に関する研究」で、最初の気象研究所地球システムモデル(MRI-ESM1)が完成することになった。平成26年から始まる「気候モデルの高度化と気候・環境の長期変動に関する研究」では改良版地球システムモデルMRI-ESM2の開発を行い、モデルが生成する気候状態や気候変動の観測との対応関係を大きく向上させた。また、モデル検証やモデルへの入力データとして重要な、観測データに基づく海面水温や海洋表層水温・塩分の歴史客観解析値を整備した。これらの解析値は、国内外で広く活用され、現業システムにも組み込まれた。

平成14年から現在まで継続する文部科学省の地球温暖化研究の国家プロジェクトでは、高解像度の全球大気モデルMRI-AGCM3.2と領域気候モデルNHRCMを組み合わせ、上記の歴史的海面水温解析値も活用して、力学的ダウンスケーリングによって地域的に詳細な気候予測を行うシステムが開発された。平成27年(2015年)開催の第21回国連気候変動枠組条約締約国会議(COP21)では、温室効果ガス排出削減等のための新しい国際枠組みを定めた

パリ協定が採択され、国内でも平成 28 年に地球温暖化対策についての閣議決定がなされた。国内外でのこうした動きがある中で、温暖化対策を検討するための基礎データとなる「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース（d4PDF）」を、国内の複数の研究機関と協力のもとで、上記の全球-領域モデルのダウンスケーリングシステムを用いて開発した。平成 29 年にデータベースを公開してからは、国内外、営利・非営利目的を問わず、幅広く活用されている。

平成 31 年から気象研究所組織は刷新され、地球システムモデル開発は全球大気海洋研究部が担当することとなって現在に至る。これまでに、第三版となる地球システムモデル（MRI-ESM3）の開発が完了し、現在、IPCC 次期評価報告書の科学的根拠の一つになる気候再現・予測実験の準備が進められている。地球システムモデルは、十年規模気候予測などの応用研究にも活用されるようになってきた。また、単一コンポーネントモデル、物理スキーム、Scup といった地球システムモデル開発に関連した成果は、気象庁現業システムに導入され、各種業務で活用されている。地球温暖化予測関連業務では、当研究部の地球システムモデルや気候予測システムは不可欠なものとなっている。

2. 海洋予測技術の開発

1970 年代（昭和 45 ～ 54 年）の研究の柱は、海況、波浪、海空相互作用、沿岸海洋環境である。特に、昭和 50 年 8 月から昭和 55 年 3 月にかけて発生した黒潮大蛇行に関連し、経常研究大項目「海況の研究」（昭和 34 ～ 54 年度）及びその副課題において、黒潮大蛇行の観測、解析、そして簡単な数値計算を通じた研究が行われた。波浪・海空相互作用の研究も盛んであり、経常研究「波浪の観測および解析に関する研究」（昭和 46 ～ 49 年度）、「海空相互作用の研究」（昭和 44 ～ 54 年度）及び「波浪予知に関する研究」（昭和 46 ～ 50 年度）等にて基礎的研究が行われ、加えて本庁海上気象課の現業のための数値波浪予報モデル（MRI モデル）が開発・実用化された。さらに、外洋波浪予報モデルの改良（MRI-II）と、沿岸波浪予報モデルの開発と業務への導入（昭和 58 年度）がなされた。また、運輸省の運輸技術研究開発費による「異常波浪発生機構の解明（異常海難防止システムの総合研究開発調査）」（昭和 57 ～ 61 年度）の研究を通じて、しばしば海難事故を引き起こした野島崎沖の異常波浪の発生機構とその実態を、風洞水槽での実験結果を組込んで精密化したシミュレーションと観測による実地検証により解明した。

1980 年代（昭和 55 ～ 平成元年）は気象研究所の筑波移転（昭和 55 年 6 月）に伴い独自のスーパーコンピュータが導入されたのを機に、海洋大循環モデルの研究が本格的に開始された。これは当研究課題最大の変革であり、以後は海洋大循環モデルが研究の柱となった。海水モデルの開発・実験も並行して経常研究「海水の数値予報モデルの開発」（昭和 61 ～ 平成元年度）で行われた。

1990 年代（平成 2 ～ 11 年）は大型研究計画とリンクしながら、現実的な海底地形をもつ海洋大循環モデルを用いた海洋動態のシミュレーションがなされた時代である。気象研究所でも、大型の国際研究である科学技術振興調整費「海洋大循環の実態解明と総合観測システムに関する国際共同研究」（平成 2 ～ 6 年度）及び「北太平洋亜寒帯循環と気候変動に関する国

際共同研究」(平成9～13年度)に参画し、対応する経常研究「北太平洋海洋循環系の実態把握と観測手法の改善」(平成5～9年度)とあわせて観測及びモデル双方から北太平洋の表層から深層に至る大循環の研究が行われた。また、大気モデルとの結合研究が経常研究「高解像度大気・海洋結合モデルによる ENSO の機構解明に関する研究」(平成6～10年度)等にて行われ、後述する海洋データ同化の開発とあわせて平成13年1月の海洋総合解析システム (COMPASS-K) の現業運用開始に繋がり、平成16年には黒潮大蛇行の発生の予測に初めて成功した。平成12年には研究室内で二系統に分かれて開発されてきた海洋大循環モデルが統合され、気象研究所共用海洋モデル (MRI.COM) として開発が始まり、令和3年までに第5版がリリースされている。MRI.COM (第2版) のマニュアルは、平成17年3月に気象研究所技術報告47号として日本語で作成され、以後、第3～5版は気象研究所技術報告に英語で出版されている。MRI.COM は海洋単体として用いられるのみならず、気象研究所の大気海洋結合モデルや地球システムモデルの海洋部分を担い、季節予報モデル構築や、IPCC へのモデル結果提出にも貢献している。

2000年代(平成12～21年)は、大気再解析データの整備が進み、経年変動する現実的な外力を用いた海洋変動のシミュレーションが進歩した時代である。この状況に対応して、経常研究「北西太平洋の力学的海況予報に関する研究」(平成13～17年度)にてMRI.COMへのネスティング手法の導入等により北西太平洋の水平解像度10km程度までの高解像度化が実現し、大蛇行を含めた黒潮の再現性が飛躍的に向上した。この成果は、経常研究「海洋環境モデル・同化システムの開発と海洋環境変動機構の解明に関する研究－フィージビリティ・スタディー－」(平成16～20年度)における海洋データ同化の開発とあわせて、平成20年2月の海洋データ同化システム (MOVE/MRI.COM-WNP) の現業運用開始に繋がった。

2010年代(平成22～令和元年)は、地球システムモデルの開発と呼応して、経常研究「海洋環境の予測技術の開発」(平成21～25年度)などにおいて海洋物質循環過程のモデリング研究が発展した。また、沿岸海洋のモデリングも、「沿岸海況予測技術の高度化に関する研究」(平成26～30年度)をはじめとする経常研究で進んだ。水深が浅い海を表現可能にする鉛直座標の導入により、太平洋海盆スケールから沿岸域までシームレスに表現可能となり、海洋データ同化の高度化とあわせて、水平解像度がおよそ2kmである日本沿岸海況監視予測システム (MOVE/MRI.COM-JPN) の現業運用開始(令和2年10月)に繋がった。このシステムは令和3年よりオホーツク海南部での海水予測にも用いられている。国外との連携では、海洋モデル相互比較プロジェクト (OMIP) や海洋生態系モデル相互比較研究計画 (MAREMIP) 等へ参加するとともに、OMIP ではJRA55-doと呼ばれる、日本の55年大気再解析 (JRA-55) に基づく海洋海水モデルを駆動するための新しい表面大気データセットの提供を行った。また、この期間に日本の海洋コミュニティへのMRI.COMの普及を目指してソースコードの貸与を開始し、平成31年からはインターネット上のプログラム・コード共有サービス「GitHub」を通して貸与している。

3. 海洋観測・海洋データ同化に関する研究

1970年代(昭和45～54年)にかけて、海況、波浪の観測・解析及び予知、海空相互作用、

沿岸海洋環境などの研究が行われた。

1980 年代（昭和 55 ～平成元年）には、新たな観測法として、日本周辺海域と北赤道海流域でベーン式及び超音波ドップラー流速系を伴う係留系による直接測流が実施された。また、リモートセンシングの分野では、従来の可視・赤外画像による海況解析に加えて、マイクロ波センサーを利用した研究も開始された。平成 2 年度から 5 年間にわたって、科学技術振興調整費による「海洋大循環の実態解明と総合観測システムに関する国際共同研究」が行われ、海洋研究部からも 9 名が参加した。これは世界海洋循環実験計画（WOCE）に日本として対応したもので、観測・データ解析・モデリング・リモートセンシングと、幅広い分野にわたる研究が行われた。

1990 年代（平成 2 ～ 11 年）には、モデリングと観測データを結びつける海洋データ同化の研究が開始された。また、衛星海面高度計データを用いた海水位変動算出の研究が行われ、高度計のデータ同化手法の開発がすすめられた。科学技術振興調整費「北太平洋亜寒帯循環と気候変動に関する国際共同研究（SAGE）」（平成 9 ～ 13 年）では、高度計データを用いた海洋データ同化システムや、等密度面追従型中層フロートなどにより、中層の循環パターンや中層水塊の形成過程に関する重要な知見を得た。本研究で培われた中層フロートに関する技術は、平成 12 年以降のアルゴアレイの構築に大いに活用された。

また、海洋データ同化・海洋予測システムのリアルタイム運用の社会的・経済的な有効性を検証する国際研究プログラム「全球海洋データ同化実験（GODAE）」には平成 10 年の提案段階から参加し、他の参加機関とともに海洋データ同化システムの開発や現業化のノウハウを世界各国に広めた。GODAE では現場観測データの重要性が指摘され、国際アルゴ計画推進の根拠の一つとなった。その後継課題である GODAE OceanView（平成 21 ～ 30 年）、OceanPredict（令和元年以降）においても、継続して重要な貢献をしている。国際アルゴ計画の開始（平成 12 年）を契機として、MRI.COM を用いた全球海洋データ同化システムの開発が進められ、アルゴフロートで観測される塩分プロファイルの同化が可能な新しい同化スキーム（MOVE）が開発された。全球海洋データ同化システムはその後改良がなされ、後述する季節予測システムの開発に貢献した。

海洋データ同化の技術は、気象庁の海況監視・予測システム（詳細は、本節第 2 項「海洋予測技術の開発」を参照。）の開発にも貢献している。平成 13 年に初めて現業化された COMPASS-K では、外洋の黒潮、親潮、中規模渦といった 100km スケールの海洋現象を予測対象として、25km 解像度の海洋モデルとデータ同化手法として最適内挿法が用いられた。その後、北西太平洋の 10km 解像度モデルの導入の際に、データ同化手法は全球システムと共通の 3 次元変分法を用いた MOVE に置き換えられた。さらに、沿岸モデリングの進展にあわせて、4 次元変分法の開発が進められ、日本沿岸海況監視予測システムに導入された。また、海洋同化とともに、オホーツク海を対象とした海水同化技術の開発も進められ、上記システムに導入されている。海況用システムを用いた日本周辺域の海洋再解析データの作成にも取り組んでおり、これまでに作成した再解析データは、海洋のみならず水産、気象、地震など幅広い分野で利用されている。

気象研究所の海洋データ同化システムは、「海洋再解析の相互比較（ORA-IP）」（平成 23 ～

29 年) や ENSO などの短期気候変動の監視予測に資する熱帯太平洋の観測システムを検討する国際プロジェクト TPOS-2020 など多数の国際的な研究プロジェクトに貢献している。また、現業解析の国際相互比較にも、平成 26 年の開始当初から現在に至るまで気象庁から全球海洋同化のデータを提供している。令和 4 年には国連海洋科学の 10 年プロジェクト「海洋予測のための相乗的な海洋観測網 (SynObs)」(令和 4 ～ 8 年) を気象研究所が主導して提案し、採択され、国際協力による大規模な観測システム実験 (OSE) を推進している。

将来の季節予報の改善や気候データ同化 (長期再解析) の高度化に資するものとして、大気海洋結合同化の開発が行われてきた。平成 21 年には大気海洋結合モデルの海洋部分だけに観測データを同化するシステムを開発し、熱帯の気候的な降水量分布の再現性の改善が示された。その後、所内横断的な研究計画で、季節予測システムの開発成果と気象庁の現業大気全球解析システムを組み合わせた大気海洋結合データ同化システムの開発・性能評価が進められている。

4. 季節予測システムに関する研究

長期予報に関する研究は、昭和 24 年に設置された気象研究所予報研究室までさかのぼることができる。統計的手法による長期予報の研究が行われてきたが、昭和 40 年代後半ごろから大気大循環モデルの開発とそれを使用した研究も行われるようになった。昭和 62 年に気候研究部が発足し、経常研究「数値モデルによる長期予報技術に関する研究」(昭和 62 ～平成 2 年度)、経常研究「月・季節平均場の長期予報に関する研究」(平成 3 ～ 7 年度) において、全球スペクトル大気モデル MRI-GSPM の開発とそれを使用した季節予測に関する研究が行われた。その後、気象庁現業モデルをベースとしたモデルを使用する方針となり、経常研究「季節平均場の力学的予測に関する研究」(平成 8 ～ 12 年度) において、気象庁 GSM9603 (全球スペクトルモデル平成 8 年 (1996 年) 3 月バージョン) をベースとし、放射スキーム等の一部物理過程を MRI-GSPM から移植した大気モデル MRI/JMA98 (MJ98、後の MRI-AGCM2) の開発が行われた。

平成元年頃から平成 10 年代前半 (1990 年代から 2000 年代前半) にかけて行われた研究により、エルニーニョ - 南方振動等の大気海洋変動の遠隔影響によって中高緯度の大気変動の季節予測が可能であることが指摘された。世界気候研究計画 (WCRP) において季節予報モデル比較プロジェクト (SMIP) が提案され、気象庁と気象研究所は GSM9603 によって参加した。これにより夏季アジアモンスーンの季節予測可能性の理解が進む一方、大気海洋結合過程の重要性が広く認知されるようになった。

また、気象庁と共同で、タイムステップを長く取ることによる高速化を可能にするセミラグランジュ法を使用した大気モデル (統一モデル、後の MRI-AGCM3) の開発が行われ、平成 17 年 (2005 年) にセミラグランジュ法を使用した現業予報モデル GSM0502 の運用が開始された。

経常研究「季節予報技術の高度化に関する研究」(平成 13 ～ 15 年度)、融合型経常研究「季節予測システムの構築と経年変動機構・予測可能性の研究」(平成 16 ～ 18 年度)、融合型経常研究「大気海洋結合季節予測モデルとそのアンサンブル手法の開発に関する研究」(平成 19 ～ 20 年度) において、気象庁と共同で季節予測システムの開発が行われた。大気モデ

ル GSM0603 と気象研究所開発の海洋モデル MRI.COM v2 を気象研究所開発のカップラー Scup で結合した大気海洋結合モデル、及び MRI.COM v2 を用いた新しい海洋データ同化解析システム MOVE/MRI.COM-G が開発され、これらを統合した季節予報システム JMA/MRI-CPS1 を完成させた。本システムは平成 20 年にエルニーニョ予測用に、平成 22 年に季節予測用に現業運用が開始された。平成 10 年代後半には、世界気候研究計画（WCRP）において気候システム歴史予報プロジェクト（CHFP）が提案され、気象庁と気象研究所は、JMA/MRI-CPS1 で参加した。この参加を通じて、大気海洋結合モデルによる季節予測の精度の優位性が明らかになった。

重点研究「全球大気海洋結合モデルを用いた季節予測システムの開発に関する研究」（平成 21 ～ 25 年度）、重点研究「季節予報の高度化と異常気象の要因解明に関する研究 副課題 1：季節予測システムの改良と性能評価に関する研究」（平成 26 ～ 30 年度）において、気象庁と共同で、GSM1011C と MRI.COM v3.2 を結合し海水モデルを取り入れた大気海洋結合モデルと、海洋データ同化解析システム MOVE/MRI.COM-G2 を統合した季節予報システム JMA/MRI-CPS2 が開発され、平成 27 年に運用が開始された。JMA/MRI-CPS2 では、モデルの高解像度化に加え、海水モデルの導入、陸面モデルの初期化、物理課程の改良が行われ、特に極域の予測精度が改善した。

令和元年に全球大気海洋研究部が発足し、基盤技術研究「地球システム・海洋モデリングに関する研究 副課題 4：全球数値予報モデル、季節予測システムに関する研究」（令和元～5 年度）において、気象庁と共同で、GSM2003C と MRI.COM v4.6 を結合し大幅に高解像度化した季節予測モデルと、海洋データ同化解析システム MOVE/MRI.COM-G3 を統合した季節予報システム JMA/MRI-CPS3 が開発され、令和 4 年に運用が開始された。JMA/MRI-CPS3 では、モデルの高解像度化に加え、海洋及び海水のデータ同化の改良、大気海洋結合モデルの改良が行われ、マッデン・ジュリアン振動（MJO）やエルニーニョ現象等の再現性や予測精度が改善した。地球システム要素（オゾン・エアロゾル等）を含むモデル（MRI-ESM3）での季節予測フィジビリティ研究にも着手している。

5. 化学輸送モデルに関する研究

化学輸送モデルに関する研究は近年になって開始された。その起源となる旧物理気象研究部第三研究室は物理気象研究部と高層物理研究部の研究室が合併して昭和 62 年に作られたが、成層圏オゾンやエアロゾル等の観測的研究（ゾンデ、航空機、分光観測等）を行う研究室であった。その後、組織再編により環境・応用気象研究部第一研究室となり、後述する環境・応用気象研究部第四研究室と統合する形で全球大気海洋研究部第三研究室となった。オゾンに関しては国立機関公害防止等試験研究費によるオゾン層研究等に取り組み、各種観測測器の開発と共にオゾンホール発見（昭和 59 年発表）の先駆であったが、この頃から成層圏オゾンの子午面循環を再現する 2 次元数値モデルの開発にも取り組んできた。エアロゾルに関しては航空機観測により対流圏における濃度分布の特徴を解明した。

旧環境応用一研（平成 9 年発足）において、オゾン・エアロゾル等のモデル研究が進んだ。オゾンに関しては地球温暖化予測に用いられる地球システムモデル（MRI-ESM）の一環と

してMRI-CCM及びCCM2等の研究開発が行われ、紫外線情報（平成17年）や大気汚染気象業務（平成22年）に活用されるとともに、気象庁の気象再解析（JRA-25、JRA-55、JRA-3Q）にオゾンの境界条件を与えた。エロゾルに関しては全球モデルMASINGARの開発が行われ、MRI-ESMの一環としてMRI-CCMと同様に地球温暖化予測や気象庁の黄砂予測（平成16年）やエロゾル再解析（JRAero；平成29年）に用いられた。また、本庁と共同で開発した二酸化炭素逆解析システムは気象庁の二酸化炭素分布情報（平成21年）に用いられた。これらの物質の監視予測精度向上にはデータ同化手法が欠かせないが、世界に先駆けてアンサンブルカルマンフィルタ（EnKF）による大気微量成分（特に黄砂と成層圏オゾン）の衛星観測データ同化に取り組んだ。現業化を目指すにはEnKFは計算機負荷が大きいため、2次元変分法による同化システムの開発にも取り組み、外部機関との連携等によりMASINGARやMRI-CCM2と衛星観測データを組み合わせて開発・実装されている。2020年代以降は深層学習を用いた代理モデルの開発等にも取り組んでいる。

旧応用気象研究部第三研究室は環境気象を所掌として雲・エロゾル関連の研究を実施した。後述する電子顕微鏡以外にも航空機や島嶼部等におけるサンプリング研究等を行い、平成4年（1992年）のピナトゥボ火山噴火後には硫酸粒子等に関する研究も実施した。

平成9年に環境応用四研となりエロゾルの観測に加えて新たにモデル研究が行われた。透過型電子顕微鏡（TEM）を使ったエロゾル研究は昭和56年にH-600を導入して開始された。平成23年度に後継機となるJEM-1400に更新した。また、走査型電子顕微鏡（SEM）を用いた研究は平成4年にS-2150を用いて開始され、平成24年度にSU-3500に機種変更した。これらの装置を用いた研究により、エロゾルの個別粒子単位での混合状態、組成情報、大気化学反応などが明らかにされた。モデル研究に関しては、平成22年11月から気象庁領域気象化学モデルNHM-Chemの開発に着手し、平成27年5月から東アジア領域水平解像度20kmモデルを現業化し、大気汚染気象業務に活用された。令和5年2月にasucaとの結合モデル（asuca-Chem）による5kmモデルの現業化を行った。また、旧地球化学研究部で実施していた人工放射性核種降下量の定点精密観測（放射能調査研究費）を旧環境応用四研が引き継ぎ、その後本研究室にて令和5年度末まで継続実施した。これら大気微量成分の観測やモデリングで培った技術を活用することで平成23年の福島第一原子力発電所事故の際には環境中に放出された放射性ガラス質微粒子（いわゆるセシウムボール）の発見及び放射性プルームの移流拡散シミュレーションに関する国内外でのモデル相互比較等へ大きく貢献することができた。

【第3節】気象予報研究部

気象予報研究部は、平成31年度の組織改編により、観測・実験・シミュレーションに基づく大気の種類物理過程の解明とそれを通じた数値予報モデル開発を主とした、基盤技術的な課題を担う研究部として設置された。現在の研究課題における大きな柱は、1. 領域気象モデル、2. 接地境界層過程、3. 放射伝達モデル、4. マクロな視点からの雲・放射の物理過程、5. ミクロな視点を中心とした雲・降水の物理過程となっている。以下では、各研究課題の歴史を振り返る。

1. 領域気象モデル

気象研究所における領域モデルの開発は、主として、予報研究部第一研究室で行われてきた。昭和 55 年以降、気象研究所非静力学モデル（MRI-NHM）の開発が進められ、その成果は気象研究所技術報告第 28 号（平成 3 年）にまとめられている。その後、気象庁数値予報課によって開発された非静力学モデルと統合され、気象研究所/数値予報課統一非静力学モデル（MRI/NPD-NHM）の初期バージョンが完成した（気象研究所技術報告第 42 号、平成 13 年）。これをベースに、平成 13 年から数値予報課で気象庁非静力学モデル（JMA-NHM）の開発が進められた（数値予報課報告・別冊第 49 号、平成 15 年）。平成 14 年にスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」が完成したことに合わせ、複数の地球シミュレータ利用プロジェクトが開始され、気象研究所は、人・自然・地球共生プロジェクト「高精度・高分解能気候モデルの開発」（平成 14～18 年度）を主導した。その中でも、JMA-NHM の高速化と物理過程の開発が進められるとともに、高解像度領域モデル（水平解像度 1km）としての気象現象の再現特性に関する知見が蓄積された。また、平成 24 年に完成したスーパーコンピュータ「京」活用のためにスタートした HPCI 戦略プログラム「超高精度メソスケール気象予測の実証」（平成 23～27 年度）では、更に高解像度化（水平解像度 10m～1km）された JMA-NHM の性能に関する知見が得られた。

戦略的創造研究推進事業 CREST 地球変動のメカニズム「メソ対流系の構造と発生・発達メカニズムの解明」（平成 10～15 年度）では、観測とモデル両面のアプローチにより、メソ気象系の発生・発達メカニズムに迫る研究が行われた。平成 23 年東北地方太平洋沖地震以降、国内の原子力発電所が停止したことを受け、再生可能エネルギーによる発電システムへの転換に向けた要請が強まった。この流れの中で、太陽光発電システムの需給バランス調整に必要な日射量予測に関する研究が、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）太陽エネルギー技術研究開発「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」（平成 22～26 年度）の下で行われた。これらの研究プロジェクトの中で、JMA-NHM によるメソ気象現象の再現性や雲・日射量の予測特性の評価が行われた。

JMA-NHM は、平成 16 年にメソモデル（MSM）として現業化され、平成 18 年に、それまでの水平解像度 10km から 5km へと高解像度化された。平成 24 年には、水平解像度 2km の局地モデル（LFM）として運用が開始された。また、JMA-NHM の現業運用に並行して、次世代非静力学モデル asuca の開発が、平成 19 年から数値予報課で進められ、平成 27 年に LFM が、平成 29 年には MSM が、それまでの JMA-NHM から asuca に移行した。

2. 接地境界層過程

大型気象風洞装置・小型気象風洞装置・回転実験装置は気象研究所が筑波移転する直前の昭和 55 年度末に完成した。大型気象風洞装置と回転実験装置は物理気象研究部の施設、小型風洞装置は気象衛星研究部の施設として出発し、その後に物理気象研究部に管理が移ったものである。

大型気象風洞装置については、完成時はもとより現在においても気象研究用の風洞としては国内有数の規模と性能を誇り、昭和末期から平成初期にかけて国内の様々な空港・明石大橋建

設予定地・余部橋梁・国立天文台すばる望遠鏡建設予定地の模型実験等に活用された。気象官署における測風塔の設置基準が風洞実験から定められたのも、この時期である。

近年においては、小型気象風洞装置や回転実験装置も含め、気象予報モデル境界層過程の高度化を目的とした乱流に関する基礎的実験に重心が移っている。令和3年度から令和5年度にかけては、線状降水帯予測精度向上などに向けた活用を見据えて大型気象風洞装置と回転実験装置の機能強化工事が実施された。

3. 放射伝達モデル

放射に関する研究は、放射伝達理論の研究とその理論に基づく放射伝達モデルの開発及び応用利用に関する研究が実施されてきた。昭和50年代にはそれまでの大気気体中の放射伝達理論やモデル化から、大気－地表系の放射伝達に関する研究に発展した。この頃から、環境問題が世界的に注目されるようになり温室効果ガスによる温室効果が問題提起され、その後地球温暖化が大きな社会問題となった。放射に関する研究もこれに対応して、気候モデル等の高速放射モデルの検証等に活用すべく、大気の放射伝達モデル計算に温室効果ガスによる温室効果を正確に再現するための研究が実施された。また、放射伝達モデルの応用利用として、リモートセンシング技術により太陽光・太陽反射光の分光測定データから大気中の微量成分や地表面の性質を抽出する研究が開始された。平成8年度からは、研究は地球温暖化に対して大きな脆弱性を持つ雪氷に対して注力されるようになり、大気－雪氷系や積雪中の放射伝達モデルの開発、及び衛星・地上リモートセンシング技術を用いた積雪粒径や積雪中不純物等の雪氷に関連した物理量を抽出するための研究が進められている。積雪中の放射伝達モデルの応用利用として、関連する他の物理過程を考慮した積雪変質モデルSMAPが開発され、気象庁の雪関連プロダクトの作成にも用いられている。また、平成23年度からは国内の極域研究プロジェクトへの参画や外部研究資金を活用して、グリーンランド等の北極域において積雪関連物理量の地上観測を行っており、観測データは雪氷域監視や積雪物理過程の解明、積雪物理過程モデルの開発・改良に活用されている。

4. マクロな視点からの雲・放射の物理過程

マクロな視点からの雲・放射に関連した物理過程の研究として、平成31年からの中期研究計画以降、主に全球モデル・気候モデルにおける積雲対流、雲、放射といった物理過程についての研究を実施してきた。他研究課題や本庁との効果的・効率的な連携のため、気象研究所版数値解析予報実験システム(MRI-NAPEX)をはじめとした庁内共通仕様の実験・評価システムを主軸として用いた研究・開発を進めている。放射過程における氷雲の雲粒有効半径の診断式の見直しが気象庁現業の全球アンサンブル予報システム(令和4年)及び全球数値予報システム(令和5年)に、層積雲スキームが季節予報システム(令和4年)にそれぞれ導入され、予測精度向上に寄与した。また雲や放射に関する研究成果は地球システムモデルに関する研究課題に提供された。

5. ミクロな視点を中心とした雲・降水の物理過程

雲物理関係の研究として、昭和 46 ～ 62 年度にかけて、氷晶核・雪片、冷たい雨の降水機構に関する研究等を行い、また、昭和 63 ～ 平成 9 年度にかけては、科学技術振興調整費による降積雪対策技術研究、混合雲の降水機構に関する研究等を行い、気象庁特別研究や海洋開発及地球科学技術調査研究促進費により、航空機や雲粒子ゾンデを用いた層積雲や巻雲の雲微物理構造の観測的研究もあわせて実施した。平成 10 ～ 15 年度にかけて行われた戦略的創造研究推進事業 CREST 課題では、航空機を用いたメソ対流系の雲微物理構造の観測的研究を実施した。また、平成 6 ～ 15 年度には、建設省（平成 13 年からは国土交通省）関東地方整備局利根川ダム統合管理事務所との共同研究として、山岳性降雪雲の人工調節可能性に関する研究を実施し、平成 18 ～ 22 年度の科学技術振興調整費による人工降雨・降雪に関する総合的研究、平成 28 ～ 31 年に行ったアラブ首長国連邦降水強化科学プログラム（UAEREP）による降水強化に関する先端的研究に発展させた。平成 16 ～ 25 年度には、上述の研究等を基に意図的・非意図的気象変化、平成 26 年度以降では、エーロゾル・雲・降水微物理の素過程解明と微物理モデル開発に重点を置いた研究を実施している。

気象研究所の筑波移転後、大型研究施設の一つとして、昭和 55 年 3 月に低温実験棟が完成した。当時は性能の異なる二つの低温室（それぞれ -30°C と -40°C まで冷却可）が整備された。垂直風洞を使用した雪片等の成長実験、噴霧器を併用した気象測器等の低温性能・改良試験などが行われてきた。平成 13 年度補正予算により低温実験施設が更新され、平成 16 年 3 月に完成した。性能の異なる二つの低温室（それぞれ -40°C と -90°C まで冷却可）のほか、実験空間内の気温と気圧を同時制御しながら雲生成過程を調べる減圧低温試験槽（雲生成チェンバー）が整備された。以降、各低温室は主に気象測器や研究用観測機器の低温性能試験に利用され、雲生成チェンバーは経常研究及びそれに資する各研究プロジェクトにて、雲生成過程の室内実験的研究で広く利用され、数値実験や野外観測とあわせてエーロゾル・雲相互作用に関する研究に貢献している。

【第 4 節】気象観測研究部

気象観測研究部は、平成 31 年度の組織改編において、近年、重要性が増してきた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による観測・解析技術の研究・開発を一つの研究部で実施することで、台風・集中豪雨等の監視・予測精度向上に向けた研究を効率的に進めるため設置された。令和 6 年 3 月現在、気象観測研究部は、レーダーを除く地上リモートセンシング（放射とエーロゾル観測・水蒸気観測技術の高度化）と衛星データの高度利用、全球とメソスケールのデータ同化技術の開発を行う研究室で構成されている。放射とエーロゾルの研究分野については気候研究部（昭和 21 年度～現在）と物理気象研究部（昭和 31 年度～平成 30 年度）の経常研究等による「放射」に関わる一連の研究から、エーロゾルと水蒸気の両方が観測できるライダー観測技術の高度化は気象衛星・観測システム研究部（昭和 62 年度～平成 30 年度）の経常研究等による「光波を使用する気象測器」に関する一連の研究から、衛星データの高度利用は「衛星データを用いた解析処理技術」に関する一連の研究から引き継がれている。これらに加え、近年の新しい測器の登場により、全球航法衛星シス

テム（GNSS）等も現在の水蒸気観測技術の高度化の研究・開発の対象となっている。データ同化の研究も比較的に新しく、全球スケールは平成 21 年度に気象衛星・観測システム研究部、その後（平成 23 年度）に台風研究部（昭和 35 年度～平成 30 年度）から、メソスケールは平成 11 年度に予報研究部（昭和 31 年度～平成 30 年度）から気象観測研究部に引き継がれたものである。

1. 放射観測技術の開発

気候形成要因としてクローズアップされていた雲と放射の問題に関しては、昭和 59 年度に特別研究「雲及び放射の総合観測手法の開発（エーロゾル測定法の開発研究）」（昭和 59 ～ 61 年度）を開始して、航空機用観測システムを開発するとともに、観測結果から測器の有効性を実証した。上記のプロジェクトは昭和 62 年度からの特別研究「雲の放射過程に関する実験観測及びモデル化の研究」（昭和 62 ～平成 2 年度）や科学技術振興調整費（総合研究）「太平洋における大気・海洋変動と気候変動に関する国際共同研究」（昭和 62 ～平成 4 年度）に引き継がれ、昭和 63 年度からの科学技術振興調整費（省際基礎研究）「気候変動に係わる対流圏・下部成層圏の化学的研究」（昭和 63 ～平成 2 年度）において地球的規模の太平洋上空成層圏の航空機観測が初めて実施された。「雲の放射過程に関する実験観測及びモデル化の研究」では、航空機観測による日射フラックス測定値の補正法や大気大循環モデルのための赤外放射スキームを開発し、気象衛星センターとともにひまわり赤外放射データから中緯度帯の降水量の算出式を作成して、その結果を第一回熱帯降雨観測計画シンポジウム（平成 2 年 1 月、東京）で発表した。

平成元年度からは、科学技術振興調整費（重点基礎研究）「全球水蒸気分布監視のための新しい遠隔測定基礎技術の開発」（平成元～5 年度）、平成 2 年度から科学技術振興調整費（総合研究）「北極域における気圏・水圏・生物圏の変動及びそれらの相互作用に関する国際共同研究」（平成 2 ～4 年度）、平成 3 年度からは科学技術庁海洋開発及地球科学技術調査研究促進費「雲が地球温暖化に及ぼす影響解明に関する観測研究」（平成 3 ～11 年度）を実施した。当時、観測と放射理論に基づくモデル計算との間に乖離があることに関し、この差が雲による日射の異常吸収に起因しているかについて論争があった。そこで「雲が地球温暖化に及ぼす影響解明に関する観測研究」の一環として実施した、2 機の航空機による同一の海洋層雲域の上側と下側での同時観測により、論争となっていた観測とモデル計算の乖離が、海洋層雲からの放射の時間空間スケールが小さいことによるものであり、雲が日射に及ぼす異常吸収がなかったことを証明した。平成 11 年度には「米国エネルギー省主催大気放射観測による集中観測 ARESE- II」にも参加し、雲の日射に対する異常吸収問題の解決が国際的に認知された。

2. エーロゾル観測技術の開発

前項では雲が気候に影響を及ぼす放射過程を述べてきたが、雲だけでなくエーロゾルや大気中の微量成分も気候や環境に影響を与えることから、平成 5 年度から環境庁地球環境研究総合推進費「東アジアにおける酸性・酸化性物質の発生、移流、変質、沈着モデルの作成」（平成 5 ～7 年度）、平成 11 年度から戦略的創造研究推進事業「アジア域の広域大気汚染による

大気粒子環境の変調について」(平成 11～16 年度)、平成 12 年度からは科学技術庁科学技術振興調整費「風送ダストの大気中への供給量評価と気候への影響に関する研究」(平成 12～16 年度)を実施し、日射の吸収過程によって放射強制力や降水過程に影響を及ぼすエアロゾルの地球規模での評価が必要であることを明らかにした。

特にエアロゾル観測に関しては、平成 21 年度から環境省地球環境保全試験研究費「吸収性エアロゾルが大気・雪氷面放射過程に与える影響のモニタリングに関する研究」(平成 21～25 年度)、平成 22 年度には科学研究費助成事業「高精度エアロゾル光学特性測定法の開発と実証観測」(平成 22～24 年度)を開始し、非球形粒子を考慮したスカイラジオメーター(プリード(株)製 POM-02 型)データの解析手法や角度分解型ネフェロメーターを開発した。平成 26 年度には環境省地球環境保全試験研究費「分光日射観測とデータ同化によるエアロゾル・雲の地表面放射収支に与える影響監視に関する研究」(平成 26～30 年度)が始まり、分光型日射観測装置を開発した。これらの成果は、平成 27 年 9 月から 10 月にスイス国ダボス物理気象観測所で開催された第 4 回フィルター型放射計比較による気象庁のスカイラジオメーターが WMO の基準内で校正されていることの確認、また、平成 27 年の気象庁スカイラジオメーターによる石垣島での大気混濁度観測(平成 28 年度にエアロゾル観測に改定)開始に繋がった。令和元年度には月光観測スカイラジオメーターの開発に研究が進展した。令和 3 年度に開発された新しい非球形粒子モデルを導入した解析ソフトウェアは現業観測だけでなく研究コミュニティにも広く採用され、エアロゾル観測技術開発の研究分野に大きく貢献した。

3. 衛星データの高度利用技術の開発

衛星データの高度利用に関わる研究は、昭和 55 年度からの経常研究「気象衛星(三軸制御方式)用放射計の研究」(昭和 55～57 年度)で開始され、昭和 57 年度からの科学技術庁海洋開発調査研究促進費「海面温度測定最適波長帯に関する研究」(昭和 57～59 年度)で海面温度や雲頂温度等の気象要素の観測法を開発し、平成 3 年度からの科学技術庁海洋開発及地球科学技術調査研究促進費「最適波長帯に関する研究(地球観測赤外線センサー利用技術の研究)」(平成 3～5 年度)においてエアロゾルの衛星放射観測への影響を検討、平成 4 年からの経常研究「将来型気象衛星システムの研究」(平成 4～8 年度)に引き継がれている。その後、経常研究「可視-赤外域での偏光観測による衛星観測手法の開発基礎研究」(平成 9～13 年度)では、偏波情報を含む非球形粒子の光散乱特性の計算に着手し、3 次元にランダムな方向性を仮定して非球形の氷晶からなる巻雲の光学的厚さと粒径情報の算出法を開発した。経常研究「衛星データを用いた大気パラメータ抽出技術に関する研究」(平成 16～18 年度)では、衛星イメージャ・赤外サウンダに対応した高速放射モデルの精度向上と高速化を実施、マイクロ波と回析格子型サウンダの複合利用による最適チャンネルの選択法や干渉型サウンダ IASI のチャンネル選択プログラムを開発した。経常研究「衛星データの解析処理技術の高度化に関する研究」(平成 19～21 年度)からは、サウンダ利用技術に関する研究を継続するとともに、雲・エアロゾルの光学的パラメータ推定技術に関する研究が進められ、可視-近赤外波長において正六角柱、集合型、フラクタル型の粒子などについて、サイズパラメータ 50～100 の粒子に対する散乱分布関数を幾何学的手法により作成した。さらに平成 26 年度からの重点研究「顕著現

象監視予測技術の高度化に関する研究」(平成 26 ～ 30 年度)では、可視から赤外波長にかけての粒子散乱特性計算手法を開発整備し、エアロゾル・氷晶・雪などに対する、より現実に近い粒子の形状を考慮した散乱特性データベースの開発を行った。また経常研究「データ同化技術と観測データの高度利用に関する研究」副課題 2「衛星・地上放射観測および放射計算・解析技術の開発」(令和元～5 年度)においては、赤外サウンダによる火山灰粒子組成の推定と静止気象衛星「ひまわり」を用いた火山灰雲物理量推定アルゴリズムの開発、大気・地表面放射モデルの改良などへと研究が大きく進展した。

4. ライダーによるエアロゾルや水蒸気などの観測技術の高度化

ライダーについては、昭和 40 年代後半に気象衛星研究部で研究が開始されたのち、気象衛星・観測システム研究部に引き継がれ、現在の気象観測研究部での一研究分野となっている。ライダーを用いて、主にエアロゾルやオゾン、二酸化炭素、水蒸気、気温等の観測技術の開発が進められてきた。これら観測技術の開発を行った社会的な背景として、エアロゾルとオゾンに関しては、昭和 57 年(1982 年)のエルチチョン火山噴火や平成 3 年(1991 年)のピナトゥボ火山噴火による全球規模での気候影響や、極域成層圏雲の成層圏オゾン層への影響、2000 年以降のアジア地域の経済発展に伴う広域越境汚染(黄砂、PM2.5、対流圏オゾン、二酸化炭素)への関心が高まったことがある。また、水蒸気に関しては、平成 26 年 8 月豪雨等で甚大な被害をもたらした線状降水帯の機構解明と予測精度向上が社会的課題となったことがある。

エアロゾル観測については、昭和 53 年度から高層用高出力ライダーを製作し、経常研究「ライダーによる気象観測法の研究」(昭和 45 ～ 55 年度)において、高出力ルビーライダーの設計と観測、解析法の開発が行われた。昭和 56 年度に経常研究「ライダーによる対流圏及び成層圏エアロゾルモニタリング研究」(昭和 56 ～ 60 年度)と改題し、成層圏汚染を対象にした中層大気の研究を開始し、昭和 57 年に噴火したメキシコのエルチチョン火山の噴火によって増加した成層圏エアロゾルの詳細な振る舞いを観測して、社会に発信することができた。また、ルビーライダーによる黄砂や雲の偏光解消度の高度・時間断面図の取得に成功した。平成 3 年 6 月にはピナトゥボ火山が噴火したため、科学技術振興調整費(省際基礎研究)「ピナトゥボ火山噴火が気候・大気環境に与える影響解明に関する研究」(平成 4 ～ 6 年度)を実施し、噴火から数年間にわたる成層圏エアロゾルの移流拡散、変質等の動態の把握、気候への影響の解明に寄与した。さらに平成 3 年はペルシャ湾岸の油田火災も発生したため、湾岸戦争油田火災起源の対流圏エアロゾルのライダー観測と航空機観測を行い、ペルシャ湾岸の油田火災に関するエアロゾルの実態を把握するとともに、火災による煤の影響を捉えることに成功した。その後は、平成 7 年度からの科学技術振興調整費「成層圏の変動とその気候に及ぼす影響に関する国際共同研究」(第Ⅰ期平成 7 ～ 9 年度、第Ⅱ期平成 10 ～ 11 年度)や科学技術庁科学技術振興調整費「風送ダストの大気中への供給量評価と気候への影響に関する研究」(平成 12 ～ 16 年度)、環境省地球環境保全試験研究費「エアロゾルによる放射強制力の変動及びメカニズムの実態解明に関する研究」(平成 17 ～ 21 年度)、環境研究総合推進費「いぶき」観測データ解析により得られた温室効果ガス濃度の高精度化に関する研究(平成 23 ～ 25 年度)、経常研究「地球環境監視・診断・予測技術高度化に関する研究」(平成 26 ～ 30 年度)、経常

研究「地球システム・海洋モデリングに関する研究」（令和元～5年度）、経常研究「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」（令和6～10年度）に引き継がれている。

ライダーはオゾンに関わる現象も重要な監視対象であり、昭和63年には成層圏オゾン観測用のライダーを開発して観測を行うとともに、平成3年度からは科学技術振興調整費（総合研究）「北極域における気圏・水圏・生物圏の変動及びそれらの相互作用に関する国際共同研究」（平成3～6年度）を行い、成層圏のオゾン減少に関係する極成層圏雲をカナダ北極圏ユーレカで捉えた。平成19年度には高度10kmまで高精度の観測が可能な対流圏オゾンライダーの開発に成功した。

ライダーを用いた水蒸気観測技術の高度化は、平成6年度からの海洋開発及地球科学技術調査研究促進費「将来型衛星搭載用ライダーに関する研究」（平成6～10年度）で開始され、平成10年度からの海洋開発及地球科学技術調査研究促進費「衛星搭載型水蒸気観測用ライダーに関する研究」（平成10～13年度）に引き継がれた。平成12年度には水蒸気ラマンライダーの開発が始まり、水蒸気が大気下層の霧の重要な発生条件となるヤマセについて科学研究費助成事業「ヤマセ雲の形成・変質機構の解明と数値モデル化の研究」（平成17～19年度）を行った。科学技術振興調整費「渇水対策のための人工降雨・降雪に関する総合的研究」（平成18～22年度）では、偏光・2波長ライダーを開発し、雲・エアロゾル・雲凝結核の出現頻度を把握した。平成30年度からの戦略的イノベーション創造プログラム第2期「国家レジリエンス（防災・減災）の強化 V. 線状降水帯観測・予測システム開発」（平成30～令和4年度）では、九州で水蒸気ライダーの観測を実施し、九州の自治体と共同で降水予測の精度向上を目指した。この実証実験の成果として、線状降水帯発生時に大気下層の水蒸気量が増加することを明らかにした。令和4年度には気象研究所緊急研究「集中観測等による線状降水帯の機構解明研究」（令和3～4年度）において、野母崎と甕島でラマンライダーを用いた水蒸気観測を実施し、線状降水帯の発生との関わりやデータ同化に用いたときの大気下層の水蒸気量による降水予測の改善例を報告した。

これら以外の気象庁業務への貢献として、平成14年から平成23年に観測部環境気象課で現業運用された岩手県綾里におけるエアロゾルライダー観測の技術的支援、空港気象ドップラーライダーの運用開始の支援を行った。

5. GNSSによる水蒸気観測技術の開発

上記のライダー観測に加え、GNSSによる水蒸気観測手法も開発した。平成9年度から科学技術振興調整費「GPS気象学：GPS水蒸気情報システムの構築と気象学・水文学への応用」（平成9～13年度）が実施され、測地研究者と気象研究者が、GPS（Global Positioning System）という研究資源を介して学際協力をを行い、相互の発展を図った。その中で、GNSS可降水量の推定技術が確立され、国土地理院「GNSS連続観測システム」で得られた全国の可降水量が、平成21年度から現業の実況監視やメソ解析等で利用されている。その後、外部資金に関しては掩蔽法を主とした課題が取り組まれ、平成21年度からの科学研究費助成事業「GPS電波掩蔽による大気構造と擾乱現象の解明」（平成21～23年度）の中で、電波掩蔽で

得た気温・水蒸気プロファイルを評価し、GPS 掩蔽データと地上 GNSS 観測による可降水量データをメソ数値予報モデルに同化した結果を示した。さらに水蒸気観測データの少ない海上でも GNSS 観測ができるように、船舶上での GNSS 観測にも応用可能な「移動体に搭載した GNSS 装置による可降水量解析技術」を開発した。大雨との関連性が指摘されている水蒸気の寄与を調査するため、平成 30 年 12 月から船舶 8 隻で東シナ海での可降水量観測を開始し、精度評価とともに数値予報へのインパクト調査を行った。気象庁では令和 3 年から、当該開発技術を用いた船舶による海上の GNSS 水蒸気観測を開始した。

6. 地上設置型マイクロ波放射計による水蒸気観測技術の開発

地上設置型マイクロ波放射計を用いた水蒸気観測の研究開発は、前項で述べた科学技術振興調整費「GPS 気象学」（平成 9 ～ 13 年度）において、GNSS 可降水量に加えてマイクロ波放射計を用いて水蒸気分布の水平スケールの特徴や変動が調べられた。可降水量分布の動態から得られた情報は、降水予測の実況監視にとって有益な知見となっている。鉛直分布については、海洋開発及地球科学技術調査研究促進費「マイクロ波分光放射計の開発」（平成 8 ～ 11 年度）や海洋開発及地球科学技術調査研究促進費「マイクロ波分光放射計による水蒸気鉛直分布観測に関する研究」（平成 14 ～ 16 年度）において推定法が開発され、平成 27 年度には更に発展した手法を用いてつくば市で発生した竜巻を生じさせた積乱雲の発生環境場の調査に適用、地上設置型マイクロ波放射計の有効性を示した。これらの結果から、気象研究所緊急研究「集中観測等による線状降水帯の機構解明研究」（令和 3 ～ 4 年度）では、令和 4 年度にマイクロ波放射計 17 台を主に西日本に展開し、線状降水帯等の予測精度向上を目指して観測を実施した。得られた観測データは「集中観測等による線状降水帯の機構解明研究」のデータベースに提供されており、令和 6 年 3 月から可降水量データが数値予報に現業利用されている。

7. データ同化とアンサンブル予測技術の開発

データ同化とアンサンブル予測技術の開発は、現業の数値解析予報システムの開発に直結していることから、現業開発部門と開発成果やソースコードを共有し、お互いの開発効率を上げるため、現業データ同化システムをベースに技術開発を実施すると同時に、更にその先の世界最先端の同化技術（例えば、格子間隔数 100m の数値予測モデルで積乱雲を再現するための技術）を見据えた開発を行ってきた。気象分野のデータ同化研究は、平成 11 年度からの気象研究所内各部共同研究「気象研究所 4 次元同化システムの構築」（平成 11 ～ 12 年度）において開始され、現業データ同化システム（最適内挿法）を気象研究所の計算機システムに移植し、平成 10 年の GAME（GEWEX アジアモンスーンエネルギー・水循環研究観測計画）の再解析を実施してその結果を公開、TMI（熱帯降雨観測衛星に搭載されたマイクロ波放射計）輝度温度から得られた降水物理量を気象庁全球モデルに取り込む同化法を開発した。平成 13 年度にはスペクトル領域モデルに基づく現業メソ 4 次元変分法が移植され、さらに数値予報課と共同で非静力学モデル（NHM）に基づく 4 次元変分法同化システムの開発を開始した。NHM に基づく 4 次元変分法同化システムの開発では、実観測データを用いた同化実験、水蒸気及び水物質の変分法変数への追加などが行われ、数値予報課では現業システム（JNoVA:

JMA Non-hydrostatic model based Variational data Assimilation system) として、気象研究所では積乱雲を陽に表現することを想定した格子間隔 1km 以下分解能雲解像同化システム (NHM-4DVAR) として、それぞれの開発基盤となった。

科研費「豪雨の力学的予測のための初期値解析と予測信頼性の評価に関する研究」(平成 17 ～ 20 年度) では、高解像度 NHM-4DVAR の開発、GNSS データ等の同化実験を行った。最終年度の平成 20 年度には、メソ 4 次元変分法、NHM-4DVAR、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF) を用いて、いくつかの局地的大雨事例の同化実験を実施した。これらの実験により、豪雨の発生要因 (例えば水平風や水蒸気分布) をより現実に近づけることで、メソ $\beta \sim \gamma$ スケールの豪雨が予測可能になるものがあることが示された。さらに予測可能性を動的に推定する手法であるメソアンサンブルシステム (メソ特異ベクトル法) を開発し、世界気象機関 (WMO) による WWRP 北京オリンピック研究開発プロジェクト (RDP) によるリアルタイム実証実験に参加した。

HPCI 戦略プログラム分野 3 課題②「超高精度メソスケール気象予測の実証」(平成 23 ～ 27 年度) や「気候変動に伴う極端気象に強い都市創り (TOMACS)」(平成 24 ～ 25 年度)、戦略的創造研究推進事業「観測ビッグデータを活用した気象と地球環境の予測の高度化」(平成 25 ～ 30 年度) に参加した。それらの成果の中で特筆すべきものとして、平成 24 年 7 月の九州北部豪雨について、NHM-LETKF を用いて強雨の発生確率分布を求め、現象発生の高いリスクが 18 ～ 24 時間前に定量的に求められる可能性を示したこと、簡易化されていないフルスペックの数値予測モデル (NHM) と多数の実観測データを用いて「京」コンピュータによる 1000 メンバー NHM-LETKF 実験を実施し、サンプリング誤差を十分に小さくするために必要なメンバー数についての科学的知見を得たことが挙げられる。

ポスト「京」重点的課題 4「観測ビッグデータを活用した気象と地球環境の予測の高度化」(平成 28 ～ 令和 2 年度) では、「京」コンピュータを用いて格子間隔を 50m まで細かくした現実と比較しうる竜巻のアンサンブル実験に世界で初めて成功するとともに、その結果を用いて竜巻の発生要因の解析を実施した。また『『富岳』成果創出加速プログラム』(令和 2 ～ 4 年度) が実施され、熊本県球磨川の氾濫事例について気象庁危険度分布と結合した高解像度 1,000 メンバーアンサンブル実験を実施し、災害に対する確率情報を創出した。これまでにこれらの研究をもとに GNSS 可降水量や気象レーダーの動径風の同化、メソ特異ベクトル法、局地解析のハイブリッド化などの手法が現業化されてきた。現在は地上設置型マイクロ放射計観測網の輝度温度や二重偏波レーダーによる偏波パラメータなどの新しい観測データの同化法などの開発に取り組んでいる。

全球スケールのデータ同化については、平成 21 年度に経常研究「衛星データの利用技術に関する研究」(平成 21 ～ 25 年度) において、気象庁全球数値予報システムが気象研究所計算機システムに移植され、全球データ同化システム及びそれを用いた衛星データ同化の研究が開始された。その後、台風研究部の重点研究「全球大気データ同化の高度化に関する研究」(平成 23 ～ 27 年度)、重点研究「台風の進路予報・強度解析の精度向上に資する研究」(平成 26 ～ 30 年度) の中で実施されていたが、令和元年度の組織改編において全球同化及び衛星同化を専門とする研究室が設置され、経常研究「データ同化技術と観測データの高度利用に関する

研究」(令和元～5年度)において研究が加速した。全球データ同化研究では、アンサンブル同化や海洋結合同化、観測誤差の客観推定や流れ依存性の導入、複数手法を用いた観測インパクト評価、全天候域での赤外輝度温度同化、ドップラー風ライダー(DWL)等の新規衛星の導入、陸域での衛星マイクロ波射出率推定の高度化、ハイパースペクトル赤外サウンダの利用高度化のための情報圧縮技術の開発など、先進的な研究テーマに取り組んでいる。さらに、宇宙航空研究開発機構(JAXA)との連携を深めて衛星データの利用を促進するため、平成20年度に設置された「JAXA-気象研連絡協議会」の下に、「衛星データ利用促進分科会」を設け、衛星同化や台風監視等を目的としたプロダクト開発に関する研究も行っている。将来の衛星計画に対する観測システムシミュレーション実験(OSSE)も実施しており、JAXAによるDWLや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について、数値予報へのインパクト評価や、効果的な観測データの処理の検討・開発を行った。特にハイパースペクトル赤外サウンダに関するOSSEは気象庁内で横断的に取り組み、気象庁がひまわり10号にハイパースペクトル赤外サウンダを搭載するという決定を行う上で、重要な判断材料となった。

【第5節】台風・災害気象研究部

台風・災害気象研究部の所掌は、台風及び災害を発生させるおそれがある気象に関する実践的研究である。予報研究部第三研究室、台風研究部第一・二研究室、気象衛星・観測システム研究部第二・四研究室が前身となり、平成31年4月の組織改編をもって台風・災害気象研究部となった。第一研究室は台風、第二研究室は線状降水帯、局地的大雨、強風、大雪等の顕著現象、第三研究室は最先端気象レーダーの技術開発、第四研究室は突風等の自動探知及び直前予測技術開発に関する研究を実施している。本節の構成として、台風、顕著現象、突風現象に関する研究史を記述し、最後の項として気象レーダー技術開発を振り返る。

1. 台風の発生、発達から温帯低気圧化に至る解析・予測技術の研究

気象研究所における台風の研究は昭和34年9月、伊勢湾台風による甚大な災害を契機に組織化された。設立時の台風研究部の構成は台風の理論・解析を担う第一研究室、台風災害及び高潮を担当する第二研究室、そして高層気象研究部のレーダー気象・降水物理関連部門を移設した第三研究室であった。台風の理論・解析研究に関しては、昭和55年の筑波移転後、研究専用の計算機資源を確保することにより大きな進展を遂げた。平成2年台風特別実験(SPECTRUM)では、数値モデルによる台風の進路予測改善に関する研究を実施した。当時現業で利用していた気象庁領域台風モデルを用いた研究は、気象庁における台風予測を全球大気モデルに一本化したこともあり、平成12年以降、非静力学気象モデルを用いた台風及び台風に伴う諸現象に関わる研究へと移行した。ここでは多重移動格子モデル及び非静力学大気波浪海洋結合モデル、更には領域大気海洋結合データ同化システム研究の開発研究を行い、平成22年台風海洋集中観測実験(ITOP)期間の台風に関する数値実験などを実施した。平成21年には、昭和34年台風第19号(伊勢湾台風)から50年という節目を迎え、当時の航空機観測データと最先端の非静力学気象モデル、領域大気データ同化システムを組み合わせた伊勢湾台風再現予報実験を実施した。平成17年から10年計画で始まった国際的研究計画である

観測システム研究・予測可能性実験計画（THORPEX）において、双方向型気象予測システムの開発（TIGGE）に参加するとともに、平成 20 年に台風特別観測計画（T-PARC）を立ち上げ、航空機観測の台風進路予測に対する影響評価を行った。平成 18 年から現在まで、TIGGE は継続している。開発された様々な技術の中で、平成 26 年にマルチモデル・アンサンブル台風進路予報手法、平成 30 年に運用が開始された台風発生予測ガイダンス及び台風強度予報ガイダンスは現在、気象庁において現業利用されている。

高潮に関しては、平成 3 年の台風第 19 号が瀬戸内海西部に高潮被害をもたらしたことを契機に、平成 5 年から力学的手法による実時間予測技術開発研究を実施した。この力学的手法に関しては平成 10 年以降、気象庁の現業で使用されている。平成 12 年以降、波浪の効果を含めた高潮モデルの開発研究が実施され、ここで得られた知見は、現業高潮モデルの改善に活かされている。

計算機を用いた数値モデル・予測システムの開発に加え、気象レーダーによる観測及びデータ解析は台風研究の推進に大きく貢献してきた。昭和 55 年に我が国最初の本格的な C バンドのドップラーレーダー、昭和 56 年に X バンドの可搬型ドップラーレーダーが更新され、2 つのレーダーのデュアル解析により関東地方に上陸した台風の観測、解析研究を実施した。また、平成 2 年と 3 年、宮古島において可搬型ドップラーレーダーを用いた観測、解析研究を実施した。平成 9 ～ 12 年にかけて、基礎的研究として運輸施設整備事業団の予算のもと、台風周辺海域において、無人小型気象観測器を用いた観測を実施した。こうした現場観測研究に加え、衛星観測の発展とともに衛星データを用いた台風研究にも取り組んでいる。平成 2 年以降、衛星マイクロ波データを用いて、台風発生期の構造変化、台風強度推定、台風中心域の温暖核構造、台風周辺風速分布の推定に関する研究を行った。平成 27 年にドボラック法と衛星マイクロ波サウンダ（AMSU）の中心気圧推定のコンセンサス導出手法、平成 28 年には AMSU の後継センサー ATMS を用いた推定手法を気象庁に提供した。ATMS を用いた強度推定手法については、平成 30 年から気象庁で本運用が開始された。この他、台風海洋相互作用に関する研究を実施し、海水温 26℃以上の海水がもつ貯熱量について、気象研究所で開発した手法が、気象庁北西太平洋海洋データ同化システムに導入された。平成 27 年から台風現業での利用が開始され、また北西太平洋域の熱帯低気圧に関する地区特別センターから提供される情報の一つとして、東アジア地域へ提供されている。

社会に影響を及ぼす台風について、気象研究所では緊急研究「平成 16 年上陸台風に関するデータベース作成とそれらの台風に伴う強風、大雨、高潮に関する速報解析」（平成 16 年度）及び緊急研究「災害をもたらした令和元年度台風の実態解明とそれに伴う暴風、豪雨、高波等の発生に関する研究」（令和元年度）を実施した。平成 31 年（令和元年）以降、社会に甚大な影響を与えた台風の即時解析に取り組んでいる。また、気象庁が作成したドボラック再解析データセットを用いて、社会の関心が高い強い台風の長期変動に関する研究にも取り組み、過去 30 年において強い台風の頻度には増加傾向がなく、強い台風の位置は近年より西側に位置する傾向にあることを明らかにしている。令和 6 年以降、発生、発達、成熟、衰退、そして温帯低気圧化とその生涯において様々な形態をとる台風の遷移過程について、TIGGE データセットに加えて、様々な予測データを用いて研究を進めている。また防災情報の高度化に資す

るため、台風域内の大雨や暴風の面的分布に関する研究を実施している。

2. 顕著現象の実態解明と数値予報を用いた予測技術の研究

昭和 50 年以降の昭和期において、予報研究部では低気圧や前線に伴う降水、地形による上昇気流と対流雲との相互作用、梅雨期の大雨、北部日本海の降雪など様々な降水系の 10 ～ 100km 規模の中小規模構造及び総観場との関係に関する研究を実施した。また気象研究所の筑波地区移転により研究用の計算機が整備されたことから、中小規模擾乱の構造や発達を研究するため、数値モデルを用いた実験に取り組むこととなった。昭和 55 年以降、天気現象の総合解析と客観的予報技術、特に降水量の短時間予測技術の改善に関する研究も実施した。客観的予報技術の研究においては人工知能技術を適用した先駆的な研究も行った。

平成期においても中小規模現象に関して、数値モデルを用いた力学的・数値的研究及び気象衛星や気象レーダーによる観測データを用いて、主に梅雨期の中小規模降水帯を対象として解析的研究を実施した。中小規模擾乱と総観場の関係に関しては、降水系の構造に関する観測、降水系の階層構造やライフサイクルに関する解析、及び統計的手法による中小規模擾乱と総観場の相互作用の研究に取り組んだ。このように、中小規模の気象は防災上重要な現象である集中豪雨・豪雪や局地的強風の予測精度向上に直接かかわることから、観測や数値モデルを用いた数値実験などにより、多様な視点での研究を実施していた。平成 5 年から平成 7 年には「つくば域降雨観測実験」、平成 9 年には「関東地域メソ解析プロジェクト」に参加し、観測データの収集、データセットの作成に協力するとともに、メソスケール現象の解析を行った。

平成 8 年以降、大学や研究機関と協働して、水平スケール 100km 規模の領域に対流性と層状性の性質を併せ持つメソ対流系、特にその自己増殖や組織化により、長時間持続して線状や塊状など様々な形態をとる機構を解明することを目的に、野外観測・データ解析・数値実験を有機的に結合した総合的プロジェクト研究を実施した。具体的には平成 8 年と平成 10 年から平成 14 年の梅雨期には東シナ海・九州において梅雨特別観測 (TREX, X-BAIU)、また平成 13 年と平成 15 年には冬季日本海において観測プロジェクト (WMO) を実施した。特に、積乱雲を解像できる非静力学気象モデルを用いた数値実験はメソ対流系の理解におけるブレークスルーとなった。集中豪雨、強風や暴風雪による災害が生じた現象については平成 16 年以降、即時的に要因分析を行い、社会に向けて情報発信をしてきている。気象研究所からは、平成 18 年 11 月 17 日の佐呂間竜巻を皮切りに、線状降水帯の用語が広まるきっかけとなった平成 26 年 8 月 20 日の広島市の大雨、平成 27 年 9 月関東・東北豪雨や令和 2 年 7 月豪雨など、計 19 件の報道発表を行ってきている。このような即時解析結果だけでなく、集中豪雨に関しては統計的研究も行い、集中豪雨の発生頻度が 45 年で約 2 倍に増加しているという研究成果についても報道発表している。長さ 50 ～ 300km 程度、幅 20 ～ 50km 程度と線状に拡がり、強い降水を伴う雨域である線状降水帯は平成 26 年の広島市での大雨以降、社会に認知されるようになった。一方で線状降水帯による災害が増加しつつあることから、令和 4 年には線状降水帯の実態把握と発生・停滞・維持等の機構解明を加速し、線状降水帯の予測精度向上とより早い段階からの確実な防災・減災対策に貢献するため、野外集中観測・データ解析・数値実験を組み合わせたプロジェクト研究を大学と研究機関との協働のもと、気象研究所の緊急研究

「集中観測等による線状降水帯の機構解明研究」（令和 3 ～ 4 年度）として実施した。

3. 顕著現象の自動探知・直前予測技術のための研究開発

昭和 62 年に気象研究所の組織改編により、気象衛星研究部から気象衛星・観測システム研究部となり、第二研究室において竜巻やダウンバーストなどの極端気象に関する観測や進路予測可能性研究に本格的に取り組むこととなった。そこで一般研究「ドップラーレーダーの実利用の研究」（平成元～平成 5 年度）において、激しい突風やマイクロバーストの他、ガストフロント・局地前線・下層ジェット・海陸風を観測・解析対象としたドップラーレーダー観測システムに関する開発研究を実施した。

平成 2 年 12 月、千葉県茂原市で発生した竜巻を契機に、竜巻発生機構や発生条件、被害や気流の特性を基礎的に把握するため、気象研究所内共同研究として、竜巻等瞬発性気象現象に関する研究を実施した。関東地方における竜巻や突風の被害調査やドップラーレーダーによるデータを用いた解析が行われ、我が国でも強い竜巻などでスーパーセルに伴うものが発生していたことやダウンバーストについての知見が得られた他、昭和 36 年から平成 5 年までの竜巻データベースを作成、これを用いた統計的研究も行われた。

平成 17 年 12 月 25 日、JR 羽越線の特急「いなほ 14 号」が竜巻の被害域の延長線上で脱線転覆し、5 名が亡くなる事故が生じた。また平成 18 年 9 月 17 日には、台風第 13 号が九州の西海上を北上中、宮崎県延岡市で藤田スケール 2 の竜巻が発生、平成 18 年 11 月 7 日にも北海道佐呂間町で藤田スケール 3 の竜巻が発生し、それぞれ 3 名、9 名が亡くなった。内閣府はこうした突風災害を踏まえ、風水害対策の一環として、竜巻等突風対策検討会を開催した。気象研究所においても「竜巻シンポジウム－わが国の竜巻研究の今後の課題と方向性－」を平成 19 年 1 月に開催し、延岡や佐呂間における竜巻の調査報告を行い、竜巻研究の課題と方向性について議論するとともに、メソサイクロン検出アルゴリズムの開発を行った。さらに平成 20 年 1 月には、世界各国の竜巻研究の第一人者を招聘した「竜巻等突風に関する専門家会合」を気象庁で開催した。こうした気象研究所の取組は、気象庁レーダーのドップラー化の加速、平成 20 年の気象庁竜巻注意情報や平成 22 年の竜巻発生確度ナウキャストの開発に貢献した。平成 24 年 5 月 6 日には茨城県と栃木県でほぼ同時に 3 つの竜巻が発生し、特に茨城県つくば市の竜巻は藤田スケール 3 に相当し、1 名が亡くなった。気象研究所では被害調査やドップラーレーダーによるデータを用いた解析、及び客観解析データを用いた環境場の解析に加え、水平解像度 1km 以下の非静力学気象モデルによる再現実験を実施するとともに、速報解析結果を同年 5 月 11 日に報道発表した。また、同竜巻を契機として高まった、より正確な風速推定の要請に応えるため、気象庁では藤田スケールに代わる新たなスケールの策定を開始し、気象研究所が東京工芸大学や（独）建築研究所等と実施していた共同研究の成果が活用され、平成 27 年に日本版藤田スケールとして策定された。

運輸分野における基礎的研究推進制度「小型ドップラー気象レーダーによる鉄道安全運行のための突風探知システムの基礎的研究」（平成 19 ～ 21 年）により、気象研究所、鉄道総合技術研究所、JR 東日本、京都大学は平成 19 年 9 月に山形県庄内地方にレーダー 2 台、地上気象観測装置を含む高密度観測網の運用を開始し、冬季日本海側の突風の実態解明と突風探知の

基礎研究を行った。その後、平成 21 年 4 月には JR 東日本との共同研究「局地的シビア現象を対象とした高精度センシング技術に関する研究」（平成 21 年～現在）が開始された。研究成果をもとに、平成 28 年 11 月には列車運転規制のための世界初のドップラーレーダーが新設され、平成 29 年 12 月には冬季日本海側の突風に対する列車運転規制方法として、JR 東日本による世界初の実用化が行われた。更に進歩を遂げたのは、気象研究所と JR 東日本が共同で深層学習モデルの開発に取り組み、その成果をもとに令和 2 年 8 月に「深層学習モデルによる突風探知」に関する共同特許を取得したことである。この新技術は、人工知能（AI）を用いて冬季日本海側の突風を探知する手法を提供し、その年の 11 月には鉄道事業者により世界初で実装された。

その後、平成 30 年 7 月から令和 5 年 3 月までの間に、PRISM（官民研究開発投資拡大プログラム）「AI を用いた竜巻等突風・局地的大雨の自動予測・情報提供システムの開発」（平成 30～令和 4 年度）が行われた。そして令和 5 年 4 月から令和 8 年 3 月までの期間、BRIDGE（研究開発と Society 5.0 との橋渡しプログラム）（令和 5～7 年度）「局地的・突発的な荒天対策のためのスタートアップとの連携：AI を用いたリアルタイム防災フィールド構築」が行われている。これらの取組は、鉄道事故防止だけでなく、より広範な防災分野における新たな技術・手法の開発につながっている。

4. 先端的気象レーダーの観測技術の研究

昭和 50 年以前から、気象に関する遠隔測定手段としてレーダーの果たす役割は重要という認識のもと、データの利用に欠かせない地形エコー除去技術やデジタル化を中心とした信号処理に関わる開発や利用法に関する研究を気象衛星研究部で実施していた。気象研究所の筑波移転に伴い、昭和 55 年に C バンドの気象ドップラーレーダー及び X バンドの可搬型ドップラーレーダーが更新され、気象レーダー反射波信号の基本特性、降水エコーの定量的測定及びドップラーレーダー測風システムの研究が行われた。3 次元走査可能な最先端の 2 つのドップラーレーダーを用いたデュアル解析の技術開発は、それを用いての台風や対流雲のメカニズムに関する研究も行われている。

昭和 62 年、気象衛星研究部は気象衛星・観測システム研究部へ組織改編された。単一ドップラーレーダーによる豪雨域の強風測定システムに関する研究とともに、気象観測を総合的に組み合わせ、効果的・効率的な観測システムを構築するための各種観測方法による同時観測を実施し、総合的な評価を行った。平成 7 年には気象庁において空港気象ドップラーレーダーが現業化されるとともに、平成 8 年には気象ドップラーレーダーのデータの解析ツールとして Draft の開発が始まった。Draft は各種レーダーデータの標準フォーマットへの変換やドップラー速度の折り返し補正、断面図描画やデュアル解析等の様々な機能を有するだけでなく、汎用性も兼ね備えており、令和の時代においても研究や調査業務などで利用され、更新を重ねている。

気象庁は将来の数値予報での利用を念頭に、関東地域とその周辺で利用可能な様々な観測データを活用して、メソ現象の解析や予報実験を行う関東地域メソ解析プロジェクト（平成 9～10 年）を実施した。気象研究所は、C バンド、X バンドのドップラーレーダーや 400MHz ウィ

ンドプロファイラによる観測、非静力学モデルを用いた予報実験、メソスケール現象の解析などを実施した。その成果として、従来にない時間的・空間的に高分解能な観測データセットと客観解析データセットの整備とそれらを用いて行われた数値予報実験や観測システム実験により、メソ現象の予測について、ウィンドプロファイラと航空機観測データ（ACARS）の有効性、時間的に高分解能なデータ同化システムの有効性などが確認された。これらの結果は、その後のウィンドプロファイラやドップラーレーダーの導入へとつながることとなった。

平成 19 年以降、シビア現象の監視及び危険度診断技術の高度化に関する研究の中で、ドップラーレーダーデータを含む各種の観測データを用いて、突風等に対する短時間予測情報提供に資する開発研究を実施した。平成 20 年には、総務省が周波数資源の有効利用を目的に気象レーダーの狭帯域化を実証するために開発した C バンド固体素子二重偏波レーダーが、気象研究所の気象ドップラーレーダーの後継として移管され、実験的な運用が開始された。このレーダーは気象用の C バンド固体素子二重偏波レーダーとしては世界で最初に開発されたもので課題も多く、実用化のための技術上の問題の解決と、シビア現象の監視及び危険度診断技術の高度化に関する研究のための観測が行われた。例えば科学技術振興調整費「顕著気象に強い都市創り」（平成 22 ～ 26 年度）では、防災科学研究所をはじめ国内外の大学・研究機関とともに、レーダーなど各種の観測装置による関東域の豪雨の観測や実態解明、レーダーと数値モデルによる直前予測、また、自治体などと連携してこの予測に基づく社会実験を行った。その中で同様なレーダーの開発を行っている米国オクラホマ大学などと共同研究を行い、固体素子レーダー用のパルス圧縮技術や多周波観測技術を開発し、これを C バンド固体素子二重偏波に実装し検証を行った。ここで得られた知見は、平成 28 年のレーダーの狭帯域化技術の研究開発及び気象庁空港気象ドップラーレーダーの固体素子二重偏波化更新に貢献した。また令和 2 年以降の気象庁一般気象レーダーの固体素子二重偏波化に役立てられることとなった。

平成 27 年、気象研究所において X バンド単偏波フェーズドアレイ気象レーダーの研究運用を開始した。半径 60km 圏内の 3 次元空間を 30 秒ごとの高い頻度で隙間なく観測することにより、局地的大雨や竜巻等突風など、激しい風雨をもたらす顕著現象のきめ細かな理解が可能となった。気象研究所では当該レーダーを多様な気象場において運用し、レーダーの性能評価やデータ処理技術の開発を進めるとともに、将来的な監視・予測技術の高度化に関する研究を実施した。フェーズドアレイ気象レーダーによる高頻度・高解像度の観測データの解析により、令和元年度東日本台風に伴う竜巻の発生メカニズムが明らかになる等、科学的成果が得られている。

【第 6 節】気候・環境研究部

気候・環境研究部は、「課題解決型」の研究部のひとつとして、平成 31 年 4 月の組織改編時に発足した。観測の実施とデータ解析や、長期再解析データや数値モデル出力の解析などを通じて、地球温暖化・気候変動や季節予報に関わる気候システムの種々の現象の実態把握、変動要因の解明、モデリング結果の検証、予測など多様な研究を行い、予報・予測性能の向上にも貢献している。その前身は、昭和 35 年に設立された台風研究部、昭和 59 年に設立された気候研究部、気象研究所創立時に設立された気象化学研究部に由来する地球化学研究部（平成

25 年に海洋・地球化学研究部に改組）である。

1. 熱帯擾乱の研究から長期再解析と異常気象・季節予測可能性の研究へ

昭和 34 年に 5,000 人を超える死者・行方不明者を出した伊勢湾台風大災害を受けて、中曽根科学技術庁長官は直後の国会で、「気象研究所の中に台風研究部を作って、実験と理論的研究をやっていくようにしたい」と答弁した。これに基づいて昭和 35 年 4 月に台風研究部（高層気象研究部の振替）が設置された。このとき新設された第二研究室（以下「台風二研」という。）が、その後の気候研究部第五研究室（平成 9～30 年度）や現在の気候・環境研究部第一研究室（平成 31 年度～）の前身である。台風二研では台風と台風の発生に関連する熱帯擾乱・熱帯大気循環に関する研究を行った。台風は、高層気象観測網の乏しい低緯度地域で発生するため、初期の台風研究は気象衛星資料の利用が重要な位置を占めていた。1960 年代はその有効利用法を開発し、1970 年代はアメリカの極軌道衛星 ESSA のモザイク写真の解析に始まり、気象衛星 NOAA や Nimbus のリモートセンシング資料の利用法の開発、そして GOES や GMS など静止気象衛星が次々と打ち上げられたこともあり、連続的な可視・赤外画像を用いた解析を行った。これらの熱帯気象研究から、日本の猛暑の分析に必須のテレコネクションパターンである PJ パターンの発見や、スーパークラスターの発見につながる研究が行われた。台風二研は、早い段階から数多くの国際プロジェクトにも組織的に参画した。主なものとして、地球大気開発計画/大西洋熱帯実験（GARP/GATE、昭和 49 年）、モンスーン実験/全球天気実験（MONEX/FGGE、昭和 53～54 年）、太平洋における大気・海洋変動と気候変動に関する国際共同研究/静止気象衛星等の資料による大気・海洋変動と気候変動の解析研究（科学技術振興調整費、昭和 62～平成 4 年）、アジアモンスーン機構に関する研究/大規模積雲対流活動と降水系に関する解析的研究（海洋開発及地球科学技術調査研究促進費、平成元～10 年）世界気候研究計画/熱帯海洋・全球大気研究計画－海洋・大気結合応答実験（WCRP/TOGA-COARE、平成 4～5 年）などがある。

平成 9 年の気候研究や環境研究の拡充を目的とした組織改編により、台風二研は気候研究部第五研究室（以下「気候五研」という。）となり、主に異常気象や気候変動の実態とその要因解明に関する研究に取り組むようになった。再解析を担当するようになった転機は、平成 10 年に WCRP/GEWEX が実施した集中観測 GAME である。そこで得られた集中観測データを用いた再解析を、当時の気候五研が担当することになった。気象庁数値予報課の当時の現業データ同化システムを気象研究所のスーパーコンピュータに移植し、およそ 2 年の歳月をかけて GAME 再解析を完成させ、研究コミュニティに公開した。なお、GAME 再解析を実施するにあたり、筑波大学・安成研究室から支援を受けた。

GAME 再解析により、再解析の経験と実績を積むことと並行して、気象庁では長期再解析の実施検討が始まっていた。力学モデルによる季節予報の実現可能性が議論される中で、数値モデルの初期値や検証データとして長期再解析が必要とされたからである。また、異常気象などのモニタリングでも、長期再解析が必要とされていた。欧米では既に 1990 年代半ばに ECMWF と NOAA/NCEP が再解析を完成させ、利用が世界的に広まっていた時期である。しかし、全球大気データ同化システムを用いた長期計算には大変多くの計算機資源が必要なた

め、気象庁の計算機では実施が困難だった。そうした状況の下で、電力中央研究所から再解析データ作成に関する共同研究と、それに伴う計算機資源提供の提案があった。観測データの整備とデータ同化システムの整備を気象庁気候情報課と気象研究所気候研究部が担当し、計算を電力中央研究所が担当することにより、長期再解析 JRA-25 は平成 18 年に完成し、研究コミュニティに公開された。これにより、気象庁も再解析実施機関の仲間入りを果たすことができた。平成 20 年には JRA-25 の完成を記念して、第 3 回再解析国際会議を気象庁や WMO、WCRP などの主催により開催した。

その後、現業モデルやデータ同化システムの開発・改良が進んで長期再解析プロダクトの更新が期待されるようになり、気象庁は平成 26 年に第 2 次長期再解析として JRA-55 を完成させた。並行して、気候五研は、再解析推進委員会での議論を踏まえ、JRA-55 ファミリーとなるサブプロダクトの JRA-55C と JRA-55AMIP を作成した。いずれも JRA-55 と同じデータ同化システムによる観測データの使用方法を変更したプロダクトであり、再解析プロダクトを用いた現象解析の理解に貢献したほか、同じデータ同化システムを用いた多様な再解析プロダクト作成の世界的な先駆けとなった。さらに、気象庁は最新の技術を用いて令和 5 年に第 3 次長期再解析として JRA-3Q を完成させた。長期再解析を実施するにあたって、気象庁本庁はデータ同化システムの維持管理と計算を行い、気候・環境研究部第一研究室（以下「気候・環境一研」という。）はプロダクトの品質評価を行うよう役割を分担し、再解析実施体制を整えた。再解析は長大計算であるため、誤りは早期に見つけ、再計算期間を可能な限り短くする必要がある。気候・環境一研では、正しく計算が行われているか検証するために、プロダクト作成中から様々な検証データ・方法を用いて品質を評価し、再解析プロダクトの作成に貢献した。

再解析データの出現は異常気象の実態解明に革新的な変化をもたらしたが、要因分析に関しては大循環モデルを用いた力学的手法を用いた研究も行われてきた。1990 年代の 1 か月アンサンブル数値予報の現業化ごろから、より予報時間の長い季節予報への数値予報の導入が検討された。季節予報では海面水温などゆっくり変動する境界条件の影響を「シグナル」として予測することが重要であり、海面水温が完全に予測できた場合に到達可能な季節予測可能性の上限を調べる研究が行われた。世界気候研究計画（WCRP）の季節予報モデル相互比較プロジェクト（SMIP）に気候情報課と共に気象研も参加している。これらにより季節予測可能性に対する理解が深まり、モデル開発の目標も明確になった。大気モデルによる海面水温感度実験が行われるようになると、海洋変動と大気現象の関係の理解が進み、異常気象の要因分析研究にも用いられた。平成 5 年、平成 6 年、平成 22 年、平成 30 年の日本の夏の異常気象の要因分析もモデルを用いた研究が行われている。また、成層圏現象の対流圏影響過程が季節予測に重要であることの認識が同時期に進んだ。令和になってからは、大気大循環モデルによる大規模実験の解析から異常気象の発現と地球温暖化との関係を定量的に示すことができるイベント・アトリビューションを実施し、日本で特に被害が大きい猛暑と豪雨に対する地球温暖化の影響について科学的に評価を行うことで、気候変動監視業務の推進に貢献した。

2. 気候変動の予測とメカニズム解明に関する研究

気象研究所は、大気大循環モデル（AGCM）、大気海洋混合層結合モデル、大気海洋結合

モデル (CGCM)、地球システムモデル (ESM) と開発を継続・発展させ、各モデルの数値実験等を通じて、気候変動のメカニズム解明を図る研究を実施してきた。世界気候研究計画 (WCRP) の結合モデル相互比較実験 (CMIP) への参加等を通じて、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の評価報告書では第 1 次 (FAR) (平成 2 年) から第 6 次 (AR6) (令和 3 年) まで、地球温暖化予測情報では第 1 巻 (平成 6 年) から第 9 巻 (平成 29 年) まで等の形で各種評価報告書等に貢献してきた。

このような気候モデルの開発は、UCLA (カリフォルニア大学ロサンゼルス校) モデルをベースにした水平解像度約 500km の大気大循環モデル MRI-GCM-I (昭和 59 年) から始まった。熱容量一定のスラブ海洋混合層を結合した MRI-AGCM1 により CO₂ 濃度倍増実験を行い、一種の気候感度として世界平均地上気温 (GMT) の 4.3K 上昇を平成元年に発表した。このとき得られた、地球温暖化に伴う降水量の増加・降水面積の減少は IPCC 第 1 次評価報告書 (FAR) (平成 2 年) に引用された大きな成果であり、これは降水強度の増加を示すものであった。平成 3 年に地球温暖化を所掌とする気候研究部第四研究室の新設もあり、気候モデル開発は加速された。

平成 7 年にはモデル上端を 100hPa から 1hPa に上げた大気モデルと海洋モデル MRI-OGCM を結合した MRI-CGM1 を開発し、CO₂ 濃度を年率 1% で漸増させ「過渡的気候応答」を推定する我が国初の実験を行い、CO₂ 濃度倍増時に GMT が 1.6K 上昇すること等を示して IPCC 第 2 次評価報告書 (SAR) (平成 7 年) に貢献した。

その後、大気モデルに気象庁全球数値予報モデルを導入し (平成 8 年)、それを基に気候モデルとしての高度化を進め、IPCC 第 3 次評価報告書 (TAR) (平成 13 年) と第 4 次評価報告書 (AR4) (平成 19 年) に貢献した。平成 25 年にはエーロゾルモデルや化学輸送モデルとカップラーで結合して炭素循環過程を導入した地球システムモデル MRI-ESM1 を発表し、IPCC 第 5 次評価報告書 (AR5) に貢献した。雲に関する物理過程や大気・海洋の高解像度化を行った MRI-ESM2.0 (令和元年) は、放射収支の改善等により、気候モデルとしての高い性能を示した。たとえば長期再解析 JRA-55 に対する地上気温の再現性は、IPCC 第 6 次評価報告書 (AR6) (令和 3 年) に向けて実施された第 6 期結合モデル相互比較実験 (CMIP6) に参加した多くのモデルの中でトップの成績を収めた。ここに至る開発過程では、放射収支・南北熱輸送、雲、水循環、降水分布、海水、海洋子午面循環等の平均状態、エルニーニョ南方振動 (ENSO) や十年規模変動などの内部変動、過去再現性・気候感度などに特に力点が置かれてきた。

これらの気候モデル開発と並行して、水平解像度約 20km メッシュの高解像度大気モデル等を開発し、過去再現・将来予測実験を進めてきた。特に平成 24 年に発表した MRI-AGCM3.2 は、降水量などの平均気候状態・季節進行等のみならず、台風をはじめとする極端現象の再現性も非常に高い、高精度・高分解能モデルである。この結果は領域気候モデルによる力学的ダウンスケーリングを通じて日本域の気候予測データの作成にも活用され、令和 2 年に発行された「日本の気候変動 2020」等の地球温暖化予測情報に活用されている。

こうした気候モデル開発と並行して、それらのモデル単独の実験や、世界の多数の研究機関から公開された CMIP 実験データ等の解析を通じて、気候形成過程及び気候変動のメカニズムを探る研究を実施してきた。初期の大気海洋混合層結合モデルによる数値実験では、海洋力

学を含まないモデルにおいても ENSO に似た年々変動が現出することを確認、大気海洋間熱フラックスに起因するメカニズムを調べた。

アジアモンスーンに関わる研究も多数行われてきた。ユーラシア大陸上の積雪が大気循環やその季節進行に与える影響を調べた研究に始まり、チベット高原などの大規模山岳がアジアモンスーンや梅雨等の気候形成、海洋や ENSO に与える影響を調べた研究、エネルギー収支を調べた研究などである。環境省地球環境研究総合推進費における一連の研究では、地球温暖化において大陸の大きな昇温が日本を含む東アジアモンスーンの変化に重要であること等を明らかにした。

気候モデルの検証を兼ねた、古気候研究も進められた。古気候モデル相互比較実験（PMIP）では、最終氷期最盛期や完新世中期をターゲットとする実験に当初から参加し、MRI-AGCM1 及び MRI-CGCM2 による独自の解析結果を報告した。

成層圏や対流圏成層圏結合についての研究にも取り組んできた。極夜ジェット振動（PJO）の現象を世界で初めて発見し、太陽活動や成層圏準二年周期振動（QBO）、火山噴火等がトリガーとなることで、PJO が気候に大きな影響を与えることを示した。また、北極振動（AO）/北大西洋振動（NAO）や南極振動（AAO）と太陽活動の間に深い関係があることを明らかにした。さらに、モデルの大気上端が高いモデルを使うと、成層圏突然昇温（SSW）とそれに引き続く気候変化について精度の高い長期予測が可能になるという予測可能性の研究等も行った。

高解像度モデルによる将来予測実験からは、梅雨の変化等に加えて、強い台風の割合の増加・極端降水現象の増加などの極端現象の変化等の気候変動メカニズム解明を進めた。一連の実験の中で実施した、水平解像度約 60km の中解像度モデルによる地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース（d4PDF）は、変動度に比べてシグナルが弱い傾向にある降水量データや低頻度な現象を含む統計的解析を可能にし、現象の解明に役立っている。

なお、これら一連の研究は、気象研究所の経常研究に加え、海洋開発及地球科学技術調査研究促進費（科学技術庁）、重点基礎研究（科学技術庁）、平成 14 年に始まった文部科学省の一連の気候変動研究、環境省地球環境研究総合推進費、科学研究費助成事業（科研費、文部科学省）などの外部予算に支えられてきたものである。

3. 大気中の温室効果ガスの動態に関する観測研究

温室効果ガスの観測は、地球化学研究部による大気・海洋間の二酸化炭素（CO₂）交換の調査を端緒として始まり、メタンや一酸化二窒素など他の温室効果ガスの観測研究にも発展してきた。中でも航空機による大気上層の温室効果ガス観測は、世界的に見ても先進的で特筆すべき観測である。また、気象研究所鉄塔を利用した CO₂ 濃度の鉛直分布と日周変動の調査（平成 4～22 年）、環境省と気象庁が平成 18 年度に設立した「地球観測連携拠点（温暖化分野）」や気象庁環境・海洋気象課との密接な連携による WMO と国内観測機関間の標準ガス比較実験の基盤的作業、東アジアから排出された温室効果ガスの実態把握に資する高精度高時間分解能の新型ラドン測定装置の開発（平成 22 年）も実施した。綾里、与那国島、南鳥島での連続観測や父島における CO₂ の研究観測、南鳥島における気象庁のクロロフルオロカーボン観測

の支援、レーザー分光法による温室効果ガス観測手法の導入と気象庁での現業化など、数々の研究・技術開発も並行して続けてきた。

地球化学研究部が実施した航空機による初めての地球規模の温室効果ガス観測は、科学技術庁の科学技術振興調整費により昭和 63 年度から 3 か年計画で実施した International Strato/Tropospheric Air Chemistry (INSTAC) においてである。INSTAC では、小型ジェット機をチャーターし、アラスカ上空の北緯 65 度からニュージーランド南方の南極大陸に近い南緯 65 度まで、主に南北太平洋と南大洋の上空にて、温室効果ガスのほか、窒素酸化物、オゾン、エアロゾル、炭化水素類の濃度を観測した。これにより、高度 11 ～ 13km におけるメタン濃度の広域分布を世界に先駆けて明らかにするなどの成果を挙げた。

今日も続く日本航空の定期旅客便による大気上層の温室効果ガス観測のきっかけは、平成 2 年 12 月に、日航財団から気象庁に、航空機の温暖化対策貢献の利用方策に関するアイデア募集があったことだった。これに温室効果ガス観測を提案し、実現性について検討の後、平成 3 年 9 月に日航財団、日本航空、運輸省、気象研究所の共同研究が発足した。はじめに試験飛行を行って、採取空気の適性を検証してから自動大気採取装置の開発を行い、航空局による厳しい使用承認審査を経て、高度約 10km におけるほぼ月 2 回の観測が、平成 5 年 4 月、日豪路線のボーイング 747-200 型機にて実現した。この航空機観測により、北半球で排出された CO₂ の南半球中緯度帯への輸送実態や、1997/98 年の大規模なエルニーニョ発生初期に、インドネシアの森林火災が引き起こした上空における一酸化炭素の異常な濃度上昇などを解明した。

観測開始から 10 年目に入るところには、日本航空ボーイング 747-200 型機の退役に伴い、観測の維持・強化に向けて、747-400 型機に搭載できる観測装置の開発や観測体制の強化を図った。そして文部科学省科学技術振興調整費により、日本航空と航空機エンジニアリングのエキスパートの JAMCO 社、国立環境研究所、東北大学、航空宇宙技術研究所などの産官学体制が敷かれ、改良型自動大気採取装置や機上で連続観測できる装置の開発を進めた。数々の厳しい環境試験を経た後、ボーイング 747-400 同型機のどの機種にも搭載できる「航空機部品」として、アメリカ連邦航空局と日本の国土交通省航空局から「追加型式設計承認」を得て、平成 17 年 12 月から CONTRAIL の名称で日豪路線に加えて欧州路線、北米路線、東南アジア路線でも観測を開始した。その後、機種変更やコロナ禍による減便など幾多の困難に見舞われながらも観測を継続し、貴重なデータを取得し続けている。

こうした航空機による温室効果ガス観測技術の知見は、気象庁が海上自衛隊厚木航空基地と南鳥島を結ぶ自衛隊輸送機を利用して実施したフラスコサンプリングによる上空の観測（平成 22 ～ 令和 4 年）にも活用された。また、上空の温室効果ガスの観測データは、地上観測のデータと合わせて、大気中の温室効果ガス増加の実態把握と変動要因の解明に役立っているほか、大気・海洋間 CO₂ フラックスの評価と合わせて、大気 CO₂ 逆解析モデルの開発と、それによる大気・陸域植生・海洋間の CO₂ 交換の時間・空間変動の評価にも役立っており、国際的に高い評価を受けている。さらに離発着時の観測データを用いて、化石燃料燃焼起源の CO₂ の主要な排出源と考えられる大都市からの CO₂ 排出量も評価した。

4. 海洋炭素循環と大気・海洋間の CO₂ 交換に関する研究

主な温室効果ガスである CO₂ の大気中濃度の変化と、その変化に海洋の炭素循環が大気・海洋間の CO₂ 交換を通じて及ぼす影響の解明は、地球温暖化が社会的に高い関心を集める前から地球化学研究部が実施してきた長年のテーマである。1990 年代までは、海洋炭素循環の研究の一環として、植物プランクトンの炭酸同化によって生産された有機物の動態や、海洋の基礎生産に大きな役割を果たす微量栄養塩の金属イオンと有機物の相互作用に関する研究も活発に行ってきた。2010 年代初めまでは海洋循環や物質循環の化学トレーサーとして、海水中における天然放射性核種（トリウム、ウランなど）や人工放射性核種（ストロンチウム 90 など）の分布・変動の調査も行ってきた。2000 年代以降は、海洋表層や海洋内部の CO₂ 変動の実態とメカニズムの解明や大気 CO₂ 濃度変化との関連や、海洋中で溶存酸素が減少する貧酸素化の現状把握と要因解明に重点を置き、炭酸系分析装置の開発・改良、栄養塩標準物質の開発、溶存酸素センサーの導入といった観測基盤技術の開発とそれらによる高度な船舶観測の実施、水中グライダーやアルゴフロートによる自律型海洋観測の推進、そして海洋大循環・生物地球化学モデルの発展と解析に力を入れ、海洋物理学と生物地球化学の研究を統合的に進めている。

非分散型赤外線ガス分析計（NDIR）とシャワーヘッド式平衡器を使用する大気と海洋表層水の CO₂ 分圧の測定は、1960 年代に技術開発を始め、昭和 43 年から昭和 47 年にかけて、東京大学白鳳丸により北太平洋から南大洋の広域で観測を行った。観測はその後いったん途切れたが、標準ガスの改良など測定方法を改善して昭和 56 年に再開し、白鳳丸での広域観測に加えて気象庁凌風丸の東経 137 度定線における研究観測を開始し、その季節変化や長期変化を解明してきた。この観測は平成元年度に本庁海洋気象部海洋課で現業化され、太平洋で最も歴史の長い海洋表層 CO₂ 分圧の時系列観測として 40 年以上にわたって継続されており、地球温暖化に対する危機感の高まりに伴って炭素循環の科学的な解明の関心と必要性が高まる中、その成果は国内外で高く評価されている。また、エルニーニョへの関心の高まりを背景に、昭和 63 年から科学技術庁の海洋開発及地球科学技術調査研究促進費などによる海洋科学技術センターとの共同研究などにより、太平洋赤道域における海洋表層 CO₂ 分圧などの年々変動に関する観測研究も実施し、エルニーニョ南方振動に伴う大気・海洋間 CO₂ フラックスの著しい年々変動を解明した。平成 8 年には、大西洋でドイツの観測船 Meteor 船上にて実施された海洋表層 CO₂ 分圧測定の国際比較実験に参加し、気象研究所の優れた海洋表層 CO₂ 測定技術を海外に示した。この国際比較実験などが契機になって、海洋表層 CO₂ 分圧のデータベース SOCAT（Surface Ocean CO₂ Atlas）が国際協力で作成され、更新されるようになり、今日、大気・海洋間の CO₂ フラックス変動の全球的評価などに活用されている。

平成 4 年には、海洋表層 CO₂ 分圧の変動メカニズムや、海洋内部の CO₂ 変動を解明するため、科学技術庁科学技術振興調整費などにより、電量滴定法による高精度の全炭酸濃度分析装置の開発にも着手した。同年末から翌年にかけて第 34 次日本南極地域観測隊の砕氷艦「しらせ」で、全炭酸濃度の航走観測をフリーマントル・昭和基地沖・シドニー間の南大洋で実施し、平成 6 年からは赤道域の観測にも導入した。同年 7 月～9 月に凌風丸で実施した世界気候研究計画（WCRP）の国際共同研究「世界海洋循環実験計画（WOCE）」の P09 ワンタイム観測では、

東経 137 度観測定線における各層採水による全炭酸濃度の断面分布観測に成功した。平成 16 年には、分光光度法による高精度の全アルカリ度分析装置や pH 測定装置の開発にも着手した。これら一連の炭酸系測定装置は、凌風丸と啓風丸による現業海洋観測に導入され、CO₂ 分圧の観測データとともに、海洋炭素循環の変動、人為起源 CO₂ の蓄積、海洋酸性化などの実態解明に活用されている。研究成果の多くは、令和 3 年 8 月に公開された IPCC 第 6 次評価報告書にも引用された。これらの観測実績により、地球化学研究部は平成 25 年に公表された太平洋の海洋炭酸系データプロダクト PACIFICA の作成に中心的な役割を果たした。その後、PACIFICA は全海洋の炭酸系データプロダクト GLODAPv2 に引き継がれ、更新されながら国際的に活用されている。

【第 7 節】地震津波研究部

1. 昭和～平成初期の研究活動

地震津波研究部は、昭和 21 年 2 月に中央气象台研究部に創設された地殻物理研究室を源流とする。地殻物理研究室は昭和 24 年 11 月にいったん廃止されたが、地震研究室として昭和 27 年 8 月に復活し、昭和 31 年 7 月には 2 研究室から成る地震研究部に改めた。

昭和 40 年度に国の地震予知計画が開始され、当研究部は地震計感部の地下埋設による SN 比改善の研究を行い、その成果は地震観測業務に広く活用された。昭和 44 年度からの第 2 次地震予知計画では全国に展開された磁気テープ記録式地震計の膨大な記録を処理する業務用地震観測処理装置の開発を行い、昭和 49 年度以降気象庁で業務化された。昭和 47～48 年度に開発を行った埋込式体積ひずみ計は、第 3 次地震予知計画で気象庁が東海・南関東地域に展開し、実用化された。

昭和 49 年 4 月、地震研究部は名称を地震火山研究部に改めた。同年度からの第 3 次地震予知計画では海底地震常時観測システムの開発に取り組んだ。この研究は 5 か年計画で気象庁の業務観測に移行することのできる本格的なケーブル式海底地震計システムを開発製作し、近い将来に大地震の発生が懸念されている東海沖に敷設するというもので、昭和 54 年 4 月には日本初のケーブル式海底地震観測システムとして気象庁の業務観測に組み入れられた。

昭和 54 年度からは第 4 次地震予知計画に基づき特別研究「地震予知に関する実験的並びに理論的研究」（昭和 54～58 年度）を実施した。この研究の成果は、気象庁本庁の地震活動等総合監視システム（EPOS）や、管区气象台及び沖縄气象台の地震津波監視システム（ETOS）の導入につながった。また、サーボ型加速度計を採用した広ダイナミックレンジの強震計の開発を行い、昭和 63 年度以降 87 型強震計として気象庁で業務化された。

昭和 59 年度からは特別研究として直下型地震予知の実用化に関する総合的研究を 2 期 10 年にわたって実施した。この研究を推進するため、昭和 58 年 10 月と昭和 59 年 10 月に 2 研究室が増設された。本震－余震型など地震活動の推移の分類に関する解析の成果は、その後、地震調査委員会による「余震の確率評価手法について」報告書（平成 10 年 4 月）に寄与し、気象庁が大地震後に呼びかける余震確率を用いた注意喚起に活用された。

2. 兵庫県南部地震後の研究活動（平成 7 年～平成 22 年）

平成 7 年 1 月 17 日、平成 7 年（1995 年）兵庫県南部地震が発生して大きな被害をもたらした（阪神・淡路大震災）、我が国の地震防災対策の見直しが迫られた。第 7 次まで進められてきた地震予知計画は地震予知のための新たな観測研究計画（平成 10 年 8 月建議）に改められ、地殻活動のモニタリングの高度化とシミュレーション手法の開発を目指すこととなった。東海地震についても、大規模地震対策特別措置法の制定（昭和 53 年 6 月）から約 20 年が経過し、この間の観測データの蓄積や解析の進展を踏まえた上で、最新の地震学の知見を取り入れた研究が求められるようになった。そこで地震火山研究部は特別研究「地震発生過程の詳細なモデリングによる東海地震発生の推定精度向上に関する研究」（平成 11 ～ 15 年度）を開始した。プレート境界面の摩擦則を取り入れた三次元数値モデルによる地震発生シミュレーションによってプレート間で発生する様々な現象を再現し、発生条件や要因を探る研究に取り組み、東海地震の繰返し間隔、平成 13 年に初めて報告された浜名湖付近の長期的ゆっくりすべりの再現などを行った。また、昭和 19 年東南海地震の津波観測値から推定された震源域は、東海地震の想定震源域見直し（平成 13 年 10 月）に役立てられた。東海地震の監視技術と予測精度の向上に関する研究は平成 16 年度以降も引き続き実施され、ひずみ計への降水影響の補正の改善に寄与するなどした。さらに、対象領域を東南海・南海地震の震源域に拡大した地震発生シミュレーションによる連動性の評価、3 次元地震波速度構造に基づくフィリピン海プレートの統一的な形状の推定などを行った。

平成 19 年 10 月の緊急地震速報の開始と同年 12 月の気象業務法の改正（地震動及び火山現象の予報及び警報の実施）にあわせ、地震火山研究部の所掌に地震動の予報の研究が加えられた。緊急地震速報の高度化に関する研究を開始し、観測データから求めた観測点増幅度によって震度予想の精度を向上した成果は平成 24 年 10 月、業務に導入された。

津波研究では、量的津波予報（平成 11 年 4 月開始）に先立つデータベースの作成において、遠地津波のモデル開発や計算などの作業を分担して行った。

3. 東北地方太平洋沖地震後の研究活動（平成 23 年～）

平成 23 年 3 月 11 日、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震が発生し、東北・関東地方の太平洋沿岸を中心に大きな津波被害を生じさせた（東日本大震災）。この巨大地震と津波に関してあらわになった地震津波業務全体にわたる様々な課題に取り組むこととなった。

地震火山研究部は、折しも重点研究「海溝沿い巨大地震の地震像の即時的把握に関する研究」（平成 22 ～ 27 年度）を開始したところであった。気象庁が初期段階においてこの巨大地震の規模を過小評価した課題に取り組み、地震波の長周期成分の監視、周期 100 秒までの様々な周期帯でのマグニチュード推定、強震動継続時間に基づく断層長推定など様々な地震規模の即時的推定手法を開発した。それらの手法の一部は平成 25 年 3 月から津波警報業務に取り入れられた。

地震動即時予測に関する研究では、巨大地震の震源域が広範囲に及ぶ場合やその発生時に強い揺れの地域が広範囲にわたる場合、あるいは異なる場所で地震が時間的に連続発生する場合でも的確な震度予測を行うための研究を行った。そして、震源とマグニチュードによらずに揺

れの伝播状況を実時間で把握して震度予測を行う新たな手法を開発した。平成 30 年 3 月に緊急地震速報の震度予想手法に導入された PLUM 法はこの考えに基づいている。

津波即時予測に関する研究では、沖合の津波観測データを用いて沿岸の津波の高さを精度よく予測する新たな手法 (tFISH) を開発した。この手法は平成 31 年 3 月から津波警報の更新に活用されている。またこの間、平成 26 年 4 月に地震火山研究部 (4 研究室) を地震津波研究部 (4 研究室) と火山研究部 (2 研究室) に再編し、津波に関するより専門的かつ高度な研究開発を実施する体制を整備した。

平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震は東海地震予知業務にも変革を迫ることになり、平成 23 年 8 月から平成 29 年 8 月にかけて内閣府が行った南海トラフ地震対策に関する様々な検討を経て、気象庁は平成 29 年 11 月から東海地震に関連する情報に代えて南海トラフ地震に関連する情報を発表することになった。この情報の適切な発表に寄与するため、地震津波研究部は平成 28 年度から南海トラフ沿いのプレート間固着状態監視、南海トラフ地震の地震像やゆっくりすべりの即時把握の研究に取り組んでいる。

【第 8 節】火山研究部

火山活動の監視・評価及び予測技術に関する研究を担う火山研究部は、地震津波研究部と同様、地震火山研究部 (昭和 49 年 4 月に地震研究部から改組) の廃止に伴い、平成 26 年 4 月に新設された。

昭和 48 年 6 月に文部省測地学審議会により建議された「火山噴火予知計画の推進について」 (現 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画) 及び同年 7 月に公布された「活動火山周辺地域における避難施設等の整備等に関する法律」 (現 活動火山対策特別措置法) に即して翌年改組された地震火山研究部の時代は、火山噴火予知・現業監視等に関する研究を 1 研究室体制で担っていた。その後、内閣府の「大規模火山災害対策への提言」 (平成 25 年 5 月) を受けて翌年設置された火山研究部は、地球物理学的手法による火山活動の監視・評価技術を研究する第一研究室と大規模噴火現象も含む火山噴出物の監視・予測技術を研究する第二研究室の 2 研究室体制になった。しかし、第二次世界大戦後我が国最多の人的災害をもたらした平成 26 年御嶽山噴火を受けた火山噴火予知連絡会等からの提言・報告を踏まえ、手がかりの少ない水蒸気噴火の前兆を捉えるために、平成 28 年 4 月に地球化学的手法による火山活動の監視・予測技術を研究する第三研究室を新たに設置した。さらに、同年 7 月には各地域火山監視・警報センターにそれぞれ第一研究室の札幌・仙台・東京・福岡分室を設置し、研究官の駐在が始まった。駐在した研究官は、担当する課題や地域の火山活動に関する研究を進めるとともに、各センターの火山活動監視及び評価業務の支援や職員の技術力向上に貢献している。現在 3 研究室体制で下記各項に関する研究を行っている。

1. 地球物理学的手法による火山活動の監視及び評価技術

火山分野における地球物理学的手法による研究では、測器開発も含めた観測技術、データ解析技術のほか、気象庁における火山活動の監視・評価・予測に関わる技術開発を行っている。

(1) 観測技術

昭和 49 年の地震火山研究部への改組とともに開始した特別研究「火山噴火予知の研究」(昭和 49 ～ 53 年度)では、桜島、阿蘇山、伊豆大島、浅間山、有珠山等の活火山において火口地形測量、光波測距、傾斜計による地殻変動観測や空中熱赤外観測を実施し、これら観測手法の火山噴火予知への有効性についての研究を行った。これら観測手法はいずれも当時の気象庁の定常的な火山観測業務にはないものであり、その後適宜業務化されている。これに引き続く特別研究「火山噴火現象監視に関する研究」(昭和 55 ～ 58 年度)では、遠隔観測(リモートセンシング)による火山の表面現象の定量的把握に関する研究、火山用長周期地震計によるマグマの動向把握に関する研究、火山用体積歪計の開発を行った。いずれも測器の開発を伴う火山観測手法が主体の研究であった。

その後、時期により地震、各種地殻変動、重力、全磁力、自然電位、熱等の観測種目に変遷があるものの、現在に至るまで一貫して野外での観測研究を行っている。この中には気象研究所において新たに導入した観測種目も多く、このうち気象庁における火山活動の監視・評価業務へ大きく寄与してきたものとして、GNSS(全球測位衛星システム)及び SAR(合成開口レーダー)が挙げられる。気象研究所では経常研究「火山の噴火機構と活動予測に関する基礎的研究」(平成 8 ～ 12 年度)において、低消費電力の 1 周波型 GPS(以下「GNSS」に統一して表記する。)受信機を開発し、有珠山や磐梯山などにおいて実用性を検証した。GNSS は、平成 14 年から業務を開始した火山監視・情報センターにおいて全国的に火山監視項目として導入された。現在、気象庁における GNSS 連続観測点はすべて 2 周波あるいはマルチ GNSS に置き換えられているが、1 周波 GNSS は気象庁連続観測に用いられた他、低消費電力・軽量ゆえの機動性を生かし、火口近傍のみでしか検出できない地殻変動を見出すなど、監視・評価業務において一定の役割を果たしてきた。特別研究「マグマ活動の定量的把握技術の開発とそれに基づく火山活動度判定の高度化に関する研究」(平成 18 ～ 22 年度)では、SAR データを用いた解析を全国の活火山に適用した。平成 23 年霧島山(新燃岳)噴火の際には火口内に蓄積する溶岩を検出し警報発表に貢献したほか、離島等の観測手段の限られる火山での活動状況の把握等でもその有用性を示し、火山噴火予知連絡会での活動評価に役立てられてきた。

ドローンを活用した火山観測については、令和元年度に始まる気象庁火山業務における活用を受け、経常研究「火山活動の監視・予測に関する研究：副課題 1(地殻変動観測等に基づく火山活動評価)」(令和元～5 年度)にて、空中熱赤外観測の技術開発を行った。

これら各種観測は全国の火山において実施してきたが、特別研究「マグマ活動の定量的把握技術の開発とそれに基づく火山活動度判定の高度化に関する研究」(平成 18 ～ 22 年度)において、伊豆大島に光波、傾斜、GNSS の稠密な連続観測網を展開したことを契機に同火山を主対象とすることとなり、観測種目を変えながらも、現在に至るまで継続的に観測研究を実施している。

(2) データ解析技術

地震火山研究部発足当初は、観測技術の開発に主眼を置いていたものが、その後は取得データの定量的解析やそれによる火山現象の解明や監視技術開発に重きを置いた研究を進めるようになった。経常研究「火山活動におけるエネルギー放出機構に関する研究(昭和 61 ～ 平成 2

年度)や経常研究「火山活動度の定量化に関する基礎的研究」(平成3～7年度)では、火山性微動に伴うエネルギー放出量の推定、爆発地震の発震機構の解明、火砕流発生・流下の監視技術等、特に地震動データを用いた研究を精力的に進めた。特に、長周期地震計や広帯域地震計のデータを活用した波形インバージョン解析による火山性地震のメカニズムの研究は、1980～90年代に気象研究所によってリードされた。

特別研究「火山活動評価手法の開発研究」(平成13～17年度)では、地殻変動をはじめとするデータ解析技術の開発や汎用ソフトウェアの作成を精力的に進めた。データ解析技術としては、有限要素法による火山地形、不均質媒質、変動源形状を反映させた力学的な数値モデルを作成するとともに、実データへの適用を進めた。このような地形や変動源形状を考慮した地殻変動源解析技術は、経常研究「火山活動の監視・予測に関する研究：副課題1(地殻変動観測等に基づく火山活動評価)」(令和元～5年度)においても境界要素法を用いたデータ解析として引き継がれ、「次世代火山研究推進事業」(平成28～令和7年度)の課題C-3「シミュレーションによる噴火ハザード予測手法の開発」と連携しながら研究開発を進めている。また汎用ソフトウェアとしては、「火山用地殻活動解析支援ソフトウェア(MaGCAP-V)」として多項目データに対応した統合解析ツールを開発し、その後の気象庁の火山業務や気象庁外の研究機関において広く活用されている。後年の研究計画においても継続的に機能を追加し、GNSS、光波、SAR等の地殻変動、全磁力、重力等のデータを解析するためのインターフェイスを提供している。

火山活動に伴う異常検知能力向上の観点で、観測データに含まれるノイズ除去の技術開発にも取り組んだ。気象庁の数値気象モデルを活用した光波測距、GNSS、SARといった地殻変動観測データについての対流圏遅延補正技術の開発は、特別研究「マグマ活動の定量的把握技術の開発とそれに基づく火山活動度判定の高度化に関する研究」(平成18～22年度)や重点研究「気象観測技術等を活用した火山監視・解析手法の高度化に関する研究」(平成21～25年度)において開始し、その後の研究計画においても継続的に進めてきた。このうち、光波測距については既に業務実装され、SARについても経常研究「火山活動の監視・予測に関する研究：副課題1(地殻変動観測等に基づく火山活動評価)」(令和元～5年度)において実用化に達した。また、タンクモデルを用いた傾斜計の降水補正について、重点研究「地殻変動観測による火山活動評価・予測の高度化に関する研究」(平成26～30年度)において技術開発を行い、令和6年度に運用を開始した火山監視情報システム(VOIS4)に実装された。

(3) 火山活動監視・評価・予測技術

的確な火山情報を発表するためには、観測技術、データ解析技術のほかに、火山現象の理解・解明や火山学的知見に基づいた観測データの整理・解釈と、それらを監視・評価・予測へ適用するための技術開発が必要である。

火山観測には様々な手段があるが、多項目の観測データを統合して火山の地下過程の解明を目指した研究として、安達太良山を対象とした経常研究「火山活動に伴う自然電位、重力変化等の観測・解析に関する基礎的研究」(平成13～17年度)が挙げられる。GNSS、地磁気、自然電位、重力、熱観測とともに、数値シミュレーションを実施し、同火山地下の熱水系の解明とそれに伴う火山現象の発生機構の解明に取り組んだ。

気象庁火山業務における大きな転換点として、平成 19 年の噴火予報及び警報の発表開始、噴火警戒レベルの導入が挙げられる。特別研究「マグマ活動の定量的把握技術の開発とそれに基づく火山活動度判定の高度化に関する研究」（平成 18～22 年度）においては、全国の火山で観測された地殻変動について、変動源の膨張量（率）や深さ等を網羅的に整理・分類するとともに、膨張率と地震活動との相関を提示した。これらの結果は、その後の気象庁における地殻変動観測に基づく火山活動監視・評価のための視点を提示するものとなった。

令和 3 年度で全国 50 の常時観測火山のうち硫黄島を除く 49 火山において噴火警戒レベルの導入は完了し、現在は火山活動評価の高度化と噴火警報の一層的確な運用が求められている。この点を踏まえ、令和 6 年度からは経常研究「火山活動の監視・評価及び予測技術に関する研究：副課題 1（地球物理学的手法による火山活動の監視及び評価技術）」（令和 6～10 年度）において、多項目データの整理・解析を通じ、監視業務や噴火警戒レベルの判定基準等の活動評価・予測技術の高度化に資するとともに、監視データによる迅速な異常検知と活動状況把握、これらに基づく確な噴火警報発表への寄与を目指した研究を実施している。

また、長年観測研究に取り組んできた伊豆大島では、地殻変動観測によりマグマ蓄積によると考えられる山体膨張を捉えるとともに、経常研究「火山活動の監視・予測に関する研究：副課題 1（地殻変動観測等に基づく火山活動評価）」（令和元～5 年度）においては、既存知見の整理や気象研究所独自観測に基づいて、噴火警戒レベルの判定基準に挙げられる現象の背景の理解や監視評価視点のための概念モデルを構築した。概念モデルに基づき、マグマ蓄積期のマグマ・揮発性成分の収支に関する諸量の定量化を行うとともに、将来の噴火に向けてマグマ上昇を検出するための手法開発等を行っている。

2. 地球化学的手法による火山活動の監視及び評価技術

火山の地球化学的な研究は、気象研究所設置以来ほぼ行われてこなかった。しかしながら、平成 9 年には、八甲田山、安達太良山や阿蘇山でのガス事故が続いたため、科学技術振興調整費「火山ガス災害に関する緊急研究」（平成 9 年度）が行われ、気象研究所は「火山ガスの現地観測技術の高度化に関する研究」を担った。さらに、平成 12 年三宅島噴火では、一時避難した住民の帰島が長期間困難となるほどの多量の二酸化硫黄の放出が噴火後も継続した。気象研究所は、気象庁及び地質調査所（現 産業技術総合研究所地質調査総合センター）と共同し、三宅島での上空からの観測を重ね、ヘリコプターを使用した火山ガス組成比（二酸化炭素/二酸化硫黄など）の観測・解析手法を確立した。この成果は後に業務展開された多成分火山ガス観測装置へとつながった。

平成 26 年御嶽山噴火の災害を受けた火山噴火予知連絡会の提言に基づき、平成 28 年 4 月に火山研究部第三研究室を設置し、火山ガスに関連する研究（地球化学的研究）の体制を整備した。

重点研究「火山ガス観測による火山活動監視・予測に関する研究」（平成 28～30 年度）では多成分火山ガス観測装置や土壌ガス観測装置、二酸化硫黄紫外線分光計などによる観測研究を開始するとともに、火山化学実験室も整備し、火山ガスや熱水、火山灰などの化学分析を開始した。この間、平成 30 年に草津白根山（本白根山）で犠牲者を伴う噴火が発生した際には、

降灰直後の火山灰を分析することで当該噴火が水蒸気噴火であり、山体内には熱水変質帯が存在していたことを明らかにした。また、同年には霧島山（硫黄山）で噴火が発生し、この前後で硫黄山周辺の熱水や火山ガスに顕著な変化が起きていることを火山噴火予知連絡会などに報告した。

経常研究「火山活動の監視・予測に関する研究：副課題 2（化学的手法等による火山活動監視）」（令和元～5 年度）では、草津白根山に位置する活動的火口湖“湯釜”の湖水分析に基づき、湯釜火口周辺で起きてきた水蒸気噴火の発生機構や火口湖直下の熱水系のモデルなどを提案した。現在、湯釜火口湖の化学組成の観測結果は当該火山の噴火警戒レベルの判定基準としても取り込まれている。また、監視に用いられている多成分火山ガス観測装置データの補正手法開発に取り組むとともに、二酸化硫黄放出率の連続把握技術の開発研究にも着手した。

令和 6 年度からは経常研究「火山活動の監視・評価及び予測技術に関する研究：副課題 2（地球化学的手法による火山活動の監視及び評価技術）」（令和 6～10 年度）において、繰り返し水蒸気噴火を起こす火山を主な対象とした火山ガスや熱水の直接採取・分析に基づく地球化学的研究を基礎とし、より簡便で迅速な火山ガス観測装置の開発にも取り組むとともに、地上や衛星観測を用い二酸化硫黄放出率の監視技術を高度化することで、マグマ噴火卓越型火山のマグマ活動推移の可視化に取り組んでいる。

3. 遠隔観測と数値モデルによる火山噴出物の監視及び予測技術

リモートセンシングによる火山噴出物の監視技術に関する研究のうち、気象衛星の画像データを用いた研究は、経常研究「人工衛星による映像の火山観測への利用に関する研究」（昭和 55～57 年度）及び経常研究「衛星画像による火山活動検出に関する研究」（昭和 58～60 年度）において、「ひまわり初号機（GMS）」により比較的規模の大きな噴火に伴う噴煙及び拡散を検出できたことに始まる。「ひまわり」の更新とともに、昭和 61 年伊豆大島噴火の「ひまわり 3 号」における噴煙の位置ズレ補正、平成 3 年のピナトゥボ火山噴火の「ひまわり 4 号」による傘型噴煙の解析などを通じて、噴煙の検出・追跡方法が確立され、衛星画像による噴煙の監視方法は航空路火山灰情報業務において現業化された。他方、気象レーダーのエコーデータを用いた研究に関しては、以前にも昭和 52 年有珠山噴火や先述の伊豆大島噴火、平成 3 年雲仙岳噴火などの際に、各地の一般気象レーダーや富士山レーダー、空港気象レーダーによる現業観測で噴煙エコーが捉えられていた。気象レーダーが火山噴出物の監視にどの程度利用できるのか検証するとともに、特に火山灰の輸送過程の解明を目標として、気象研究所が経常研究「火山の噴火機構と活動予測に関する基礎的研究」（平成 8～12 年度）において、可搬型ドップラーレーダーを桜島周辺に設置して研究観測したのは平成 8 年 7 月が最初である。この観測期間中の噴火活動は低調であったが、南岳山頂火口から上昇した弱い噴煙エコーを解析した結果、火山灰が上昇・下降に伴い水膜に覆われたり併合・成長したりする過程で反射強度が変化することを確認した。

また、空振観測による火山噴火の監視技術に関する研究では、平成 18 年 3 月末まで、核実験探知を目的として全国の気象台に設置された微気圧計などで観測された波形データを用いて、昭和 55 年のセント・ヘレンズ噴火による気圧波の解析的な研究などを行った。しかし、

核実験探知用の微気圧計や大気観測用の気圧計の周期特性は火山近傍でより短周期の空振を観測するには適さない。そのため、気象研究所では超低周波マイクロフォン（以下「空振計」という。）による観測研究を開始し、地方共同研究「桜島および霧島山火山活動の特性の解明」（平成 5～7 年度）において、空振計を桜島島内に設置して爆発的噴火の検知に有効なことを示し、その後の気象庁における常時観測点の増設につながった。この間、科学技術振興調整費「雲仙岳のマグマ活動に伴う諸現象に関する緊急研究」（平成 3 年度）や経常研究「火山活動度の定量化に関する基礎的研究」（平成 3～7 年度）では、空振計の多点観測による波源決定により、溶岩の崩落場所や火砕流の流走経路を同定し、同方法は平成 12 年有珠山噴火でも活用された。平成 8～10 年度には科学技術振興調整費（国際共同研究総合推進制度（二国間型））「火山性震動と噴煙に関する研究」において、カムチャツカ半島のカリムスキーなどで噴煙観測、地殻変動観測、全磁力観測とともに地震・空振観測を行い、桜島や諏訪の瀬島の噴火と似た特徴を持つことなどを明らかにした。

火山の監視・予測に大気観測・予報技術を応用することを主題とする研究課題は、融合型経常研究「火山観測データの気象補正等による高精度化に関する研究」（平成 18～20 年度）から本格的に始まり、空振の伝搬に影響する上層風を考慮して波源の決定精度を向上させることなどを行った。続く重点研究「気象観測技術等を活用した火山監視・解析手法の高度化に関する研究」（平成 21～25 年度）からは、平成 12 年三宅島噴火の際に実施された火山ガスシミュレーションの研究などにに基づき、新たに全球及び領域移流拡散モデルによる浮遊火山灰及び降灰予測技術の研究開発が始まった。この間、科学技術振興調整費「平成 23 年霧島山新燃岳噴火に関する緊急調査研究」（平成 22 年度）に参加し、連続的噴火に伴う噴煙高度の時間変化は、監視カメラでは十分観測できない場合でも気象ドップラーレーダーでは観測可能であること、運輸多目的衛星（MTSAT-2）と待機衛星（MTSAT-1R）の高頻度観測による火山灰雲の雲頂高度と整合すること、そして領域移流拡散モデルの初期値に適用することにより降灰予測の精度が改善し、降礫予測も可能であることなどを、現地で行った監視カメラによる画像データや降灰調査による観測データなどとともに示した。これらの研究成果は、平成 24 年度の降灰予報の高度化に向けた検討会及び翌 25 年度にかけて火山噴火予知連絡会の火山活動評価検討会での噴火現象の即時的な把握手法についての検討に活用され、平成 27 年 3 月の降灰予報の高度化（量的降灰予報）につながった。

平成 26 年 4 月に火山研究部が発足し、火山噴出物に関する研究を所掌する第二研究室が設置されると、同年から始まった重点研究「大規模噴火時の火山現象の即時把握及び予測技術の高度化に関する研究」（平成 26～30 年度）において再度、桜島周辺に Ku バンド高速スキャンレーダーと X バンド MP レーダーを設置して研究観測を行い、噴煙の詳細な内部構造の時間変化を捉えるとともに、続く経常研究「火山活動の監視・予測に関する研究：副課題 3（火山噴出物の監視技術とデータ同化に基づく輸送予測）」（令和元～5 年度）にかけて、気象レーダーを用いた噴煙高度の確率的推定手法と火山噴出物の定量的推定手法を開発した。また火山噴出物の予測技術については、全球及び領域移流拡散モデルを統一した気象庁移流拡散モデル（JMA-ATM）を新たに開発し、気象衛星・レーダーの観測データから JMA-ATM の初期値を作成する火山灰データ同化システムとともに、令和 3 年 3 月に降灰予報及び航空路火山灰情

報の計算を行う気象庁スーパーコンピュータシステム（NAPS）に導入して現業化した。その後、海域で発生した令和3年福徳岡ノ場と令和4年フンガ・トンガーフンガ・ハアパイ火山の大規模噴火について、気象衛星による噴火規模の即時的推定の技術開発に向けた「ひまわり8号」の位置ズレ補正した画像解析などを行った。

令和6年度からは、経常研究「火山活動の監視・評価及び予測技術に関する研究：副課題3（衛星解析等による火山噴出物の濃度・確率予測技術）」（令和6～10年度）において、二重偏波気象ドップラーレーダーによる噴煙解析、「ひまわり9号」による浮遊火山灰の濃度解析やアンサンブル予報による確率予測などの研究開発を進めるとともに、「次世代火山研究推進事業」（平成28～令和7年度）の課題C-3「シミュレーションによる噴火ハザード予測手法の開発」とも連携して、風の影響や傘型噴煙の力学を考慮した噴煙モデル（NIKS-1D）を新規開発して大規模噴火を想定した降灰シミュレーションを実行している。

【第9節】 応用気象研究部

「応用気象」が組織上の名称として現れたのは、昭和17年である。当時、中央气象台の内部部局に研究部が設置され、6つの研究室の一つとして応用気象研究室が置かれた。当時の研究内容は物理気象に関するものであった。その後気象研究所の設置などいくつかの変遷を経て、昭和31年、気象研究所が部制となり、応用気象研究部が誕生した。

1. 黎明期の応用気象研究部

昭和30年代から昭和50年代にかけての高度経済成長期には、工業化に伴う影響が顕在化し公害が社会問題となっていた。そのため、大気汚染・拡散の研究や、大気汚染源の排出規制の問題に関連した濃度シミュレーションモデルの開発にも力を入れるようになった。その間、これまでの主な研究分野であった衛生気象学は生気象学・環境気象学の分野に進化した。これにより、気象に対する生体の反応や気候と病気の関係など新しい分野が開拓された。また、雲物理学的研究においては、大気中の凝結核や氷晶の形成が取り入れられ、大気中の核実験に起因する放射性塵の研究や人工降雨の実験が行われた。さらに、筑波移転を機に更新された電子顕微鏡や、昭和62年度の補正予算で整備されたライシメータ（接地気象観測装置）などを活用して霧の制御や吸湿性粒子物質を考慮した大気・地表面相互作用の研究、大気境界層における水循環の研究を行った。

2. 環境・応用気象研究部への改組

昭和60年代後半から、温室効果ガスによる地球温暖化やフロンガスによるオゾン層の破壊など、地球規模での環境問題が表面化し、広く認識されるようになった。このような状況に対処し、環境気象研究の一層の拡充を図る目的で、平成9年、応用気象研究部は旧物理気象研究部の一部と合併し、環境・応用気象研究部に改組された。主な研究分野は、大気環境関連の研究、陸面過程の水・熱収支に関する研究、都市を含む局地気象に関する研究、地域気候モデルによる日本域の気候変動予測に関する研究である。

大気環境関連の研究としては、大気中のオゾン・エアロゾルの変動とその原因をもたらし物

質について、昭和 40 年代から継続してきた観測研究を行い、航空機やゾンデ、リモートセンシングを駆使した野外観測を、測候所、地方官署などと協力し実施した。また、平成 2 年から平成 11 年度にかけて西太平洋域のエロゾルやオゾン等大気化学に関する航空機観測を実施し、海塩粒子の組成が大気中で変質する様子を観測することに成功した。様々な地域の上空で採集されたエロゾル粒子の組成・性質は、分析用電子顕微鏡を用いて調査し、その変質過程が明らかになった。

さらに、平成 10 年代後半には、オゾンやエロゾルなどの大気微量物質の挙動を監視・予測するための数値モデルの開発が行われ、気象研究所エロゾルモデル (MASINGAR: Model of Aerosol Species in the Global Atmosphere) が完成した。MASINGAR は、非海塩起源硫酸塩、炭素系、鉱物ダスト、及び海塩由来のエロゾルを含み、移流や拡散、地表面からの放出、乾性・湿性沈着、化学反応などのプロセスを扱う。MASINGAR と気象研究所化学気候モデル (MRI-CCM: Meteorological Research Institute Chemistry-Climate Model) が、大気海洋結合モデル (MRI-CGCM3: MRI Coupled Global Climate Model 3) と結合して地球システムモデル (MRI-ESM1: Earth System Model 1) が構築された。これによりオゾン、エロゾル、物質循環の大気・海洋に与える影響を包括的に扱うことが可能になった。

陸面過程の水・熱収支に関する研究としては、多様な地表面における水・熱の交換過程を明らかにするために、森林、乾燥域、草地などで観測を実施し、バルク法を基礎とした水・熱輸送のパラメータ化を行った。平成 16 年には三上正男主任研究官によるタクラマカン砂漠における長年の現地観測を中心とした研究活動が評価され、中国から友誼賞、天山賞が授与された。

局地気象に関する研究としては、平成 8 年度から関東地方における霧ややませに伴う下層雲の出現頻度や統計的特性を明らかにした。また、分解能 10km、7km、5km の非静力学モデル (NHM: Non-hydrostatic Model) による関東地方の局地前線のシミュレーションを行い、その発生機構を調査した。さらに、平成 10 年代から開発が進められてきた、都市域の地表面過程を表現可能な都市キャノピスキーム (SPUC: Square Prism Urban Canopy scheme) については、平成 20 年代に NHM、及び非静力学地域気候モデル (NHRCM: Non-hydrostatic Regional Climate Model) に組み込むことに成功した。また、SPUC スキームは気象庁ヒートアイランド監視モデルにも採用され、「ヒートアイランド監視報告」へ貢献した。その後更に改良を進め、文部科学省・気候変動リスク情報創生プログラム (平成 24～28 年度) において、高度化した SPUC と WBGT (熱中症指数) 診断スキームを実装した 2km 分解能 NHRCM による温暖化予測実験を行った。

日本域の気候変動予測に関する研究のための地域気候モデル RCM (Regional Climate Model) の開発は、平成に入る頃から開始された。RCM は、当時の気象庁の現業モデル JSM (Japan Spectral Model) を長期積分用に改良したもので、全球モデル (緯度 4°×経度 5°) に JSM120 (分解能 120km)、さらに JSM40 (分解能 40km) と多重ネスティングが行われた。RCM による日本域の温暖化予測結果は、気象庁温暖化予測情報第 4 巻 (平成 13 年度) に掲載され、以降は毎回の気象庁温暖化予測情報に RCM の結果が掲載されるようになった。その

後も、陸面植生モデルの導入や、NHM をベースとした非静力学地域気候モデル NHRCM が開発され、高分解能化が進んだ。平成 17 年度には各研究部から横断的にメンバーが組織され、気象庁地球環境・海洋部気候情報課からもメンバーが加わり、重点研究「温暖化による日本付近の詳細な気候変化予測に関する研究」（平成 17 ～ 21 年度）が始動した。本研究で得られた成果は、21 世紀気候変動予測革新プログラム（平成 19 ～ 23 年度）や、地球環境総合推進費による温暖化影響評価のためのマルチモデルアンサンブルとダウンスケーリングの研究（平成 19 ～ 23 年度）の推進に寄与した。その間にも地域気候モデルは発展を続け、高分解能化(5km、2km、1km)、陸面過程の改良などのモデルの高度化が図られた。

平成 20 年代後半には、気候変動予測とそれに伴う不確実性の定量評価のため、数千年分にも及ぶ大規模アンサンブル実験（d4PDF: database for Policy Decision making for Future climate change）が実施された。これは文科省・気候変動リスク情報創生プログラム（平成 24 ～ 28 年度）における成果であり、当研究部からの大きな貢献によるものである。d4PDF の 20km、5km 大規模アンサンブル過去実験では、従来、評価が困難であった顕著現象の発生確率の変化などが明らかになった。これらのデータセットは公開され、治水、農業、生態系、観光分野など様々な分野で利用されている。

3. 再び応用気象研究部へ

温暖化を巡っては、平成 30 年に「気候変動適応法」が施行され、効果的な防災対策につながる気象情報の提供や気候の変化による影響・リスクの評価、さらに社会経済活動での気象・気候情報の利活用促進などが求められるようになった。令和元年、環境・応用気象研究部は、組織改編により再び応用気象研究部となり、時間的にシームレスな気象予測の災害・交通・産業への応用に関する研究を行うようになった。これまでの大気環境関連の研究は、新組織の全球大気海洋研究部に引き継がれた。主な研究分野は、地域気候モデルの予測結果の信頼性向上に関する研究、防災・交通分野への気象情報の利活用に関する研究、産業活動のための気候リスク管理に関する研究である。

地域気候モデルに関する研究では、従来の NHRCM の高度化に加え、気象庁現業モデルである asuca にスペクトルナッジングを導入するなど、長時間積分可能な気候モデルとして実行環境を整備した。さらに計算処理速度の高速化、モデル性能向上のための改良などを続けている。また、都市キャノピースキーム（SPUC: Square Prism Urban Canopy scheme）を asuca に移植する計画も進行している。また、モデル結果の再現・予測結果に対する信頼性評価のため、異なる分解能の NHRCM による風の再現性についての調査や、降水バイアスの原因の一つとされる積雲パラメリゼーションのパラメータの影響など詳細な調査を進めた。

NHRCM を用いた d4PDF に関連する研究は引き続き行われ、統合的気候モデル高度化研究プログラム（平成 29 ～ 令和 3 年度）、気候変動予測先端研究プログラム（令和 4 ～ 8 年度）への貢献へとつながっている。

防災・交通分野への気象情報の利活用に関する研究では、大雨、台風、高潮・高波などの顕著な現象に対する防災気象情報の拡充、予報精度の向上にむけて、数値予報データ等を利用し、防災業務に関連するプロダクトや新たな予報ガイダンスの開発に取り組んでいる。これまでに、

世界各国の全球アンサンブル予測値を活用し、台風の予測進路の不確実性を考慮し、予測のばらつきに応じて予報円を動的に変化させる手法を開発した。この成果は、気象庁アジア太平洋防災センターに共有され、気象庁の発表する台風予報に令和元年の台風シーズンから導入された。また、気象庁がキキクルで発表している洪水予測情報の高度化に向けて、融雪などを考慮した洪水予測モデルの改良や次世代洪水予測モデルの開発、粒子フィルターによる水位同化手法の開発などにも取り組んでいる。さらに、沿岸域の防災情報改善のため、潮位や高潮、波浪等の関連する個別の様々な現象を統合した総合的な水位により、沿岸災害リスクを評価する手法の開発も開始した。

産業活動のための気候リスク管理に関する研究では、これまでに、週間～季節予測情報を利活用した気候リスク管理について関連研究機関や大学との共同研究を進め、再生可能エネルギー分野や洪水予測分野で成果を上げた。利活用の裾野を拡大するための簡便な手法としてWMO が提唱する分野別気候指標を、官署データ及び AMeDAS データに対して算定し、気候変動の検出とその地域特性を調査した。また、この気候指標計算を客観解析データや JRA-55 再解析をダウンスケールしたデータに対しても行い、気候指標の変化の再現性を評価した。さらに、農業分野での気候予測情報の精度評価や、気候指標の利活用についての研究を進めている。

このように、応用気象研究部の研究は社会の要請や科学技術の発展を踏まえて変化しているが、近年は気象・気候予測に関する情報利活用とリスク管理を中心に、より実用的な研究に重点を置いている。

第3章 高層気象台

高層気象台は、気象台官制（大正9年8月公布の勅令第294号）により、文部大臣の管理に属する三つの気象台の一つとして、中央気象台、海洋気象台と並立する形で大正9年に茨城県筑波郡小野川村館野（現在のつくば市長峰）に設置された。所掌事務は「高層気象の観測及び調査に関すること」であった。昭和12年10月には、埼玉県児玉郡本庄町上北原（現在の埼玉県本庄市）に本庄出張所が設置された（昭和32年9月に廃止）。昭和14年10月には、気象台官制を改めた気象官署官制（勅令第740号）により実施された気象事業の一元化により高層気象台は中央気象台の指導を受けることとなり、所掌事務は「(i) 航空気象の基礎的研究、(ii) 高層気象の観測、調査、報告及び研究、(iii) 超高層気象の観測、調査、報告及び研究」と定められた。昭和31年7月に運輸省設置法が改正され中央気象台は気象庁となり、同法（平成13年1月の中央省庁等の再編以後は国土交通省組織令）において気象庁の附属機関である高層気象台の所掌事務は「高層気象に関する精密な観測及び調査並びに高層気象に関する気象測器の試験及び改良」と定められた。また、気象庁組織規則において、下層気象、上層気象及び超高層気象、高層気象に関連する地上気象、並びに太陽及び大気の輻射（日射・放射）のそれぞれについて所掌事務の詳細が定められている。

以下、第1節で、高層気象台が設立された後、現在に至るまでの高層気象台のあり方に大きな影響を与えた国際地球観測年（IGY）までに行われた観測を概観する。第2節では、高層気象台が実施する観測についてその詳細を記載する。まず第1項で下層気象及び上層気象の観測として、ラジオゾンデを用いて行ってきた高層気象観測について記述する。超高層気象の観測対象としてきたのは大気中オゾンと紫外線であり、下層及び上層に存在するオゾンを観測対象とするオゾンゾンデ観測とともに第2項に記述する。第3項では日射・放射観測について記述する。第4項は下層大気の観測として、地上気象観測と、かつて下層気象の観測として行われていた係留気球観測及び地上オゾン観測について記述する。なお、第2節では各観測の手法の確立や改善等を目的に行われた調査や試験についても適宜触れている。最後の第3節では、試験・調査の結果の公表等、その他の取組について記述する。

【第1節】高層気象台の設立から国際地球観測年（IGY）まで

高層気象台で最初に観測が始まったのは地上気象観測（大正9年11月）で、続いて測風気球観測（大正10年4月）、凧、係留気球（大正11年7月）による高層気象観測が始まった。測風気球観測は、小型の気球を飛揚し、測風経緯儀で追跡して高層風を観測するものである。また、凧や係留気球による観測は、地表面とケーブルで係留された凧や気球によって気象測器を上空に運び、上空の気圧・気温・湿度等を観測するものである。気象測器を気球につるして飛揚し、気球破裂後にパラシュートで落下した測器を回収して高層の大気を観測する探測気球による高層気象観測は、高層気象台では大正12年に、本庄出張所では昭和13年に始まった。昭和19年10月には、気球につるした測器の測定値を無線で地上に送信するラジオゾンデに

よる高層気象観測を開始した。ラジオゾンデ観測の開始に伴い、探測気球による観測を高層気象台では昭和 19 年に、本庄出張所では昭和 24 年に終了した。また、風や係留気球による観測も、ラジオゾンデ観測の開始に伴い終了した。気圧計と無線送信器等で構成される観測器（レーウィン）を気球につるして飛揚しその信号を無線方向探知機で追跡することにより、測風経緯儀による目視観測と比べ天候に左右されずに風を測定できる無線測風観測（レーウィン観測）については、昭和 19 年 4 月にレーウィン受信室を中央気象台布佐出張所から移設して研究を開始し、9 月以降のレーウィンによる調査目的の観測を経て、昭和 23 年 11 月に観測を開始した。当初、レーウィン観測の感度が悪く観測可能高度も低かったことから、測風経緯儀による観測を併用した。

その後、発信器（ラジオゾンデ）は、レーウィン観測とラジオゾンデ観測を同時に行うレーウィンゾンデへと変わり、方向探知機についても、昭和 30 年に国産の D55A 型自動追跡記録型方向探知機が開発された。高層気象台では、これを用いた観測を昭和 32 年 4 月に開始するとともに、指向性の強い送信周波数 1,680MHz の RS II 56 型レーウィンゾンデが使用された。これらの技術の導入により観測精度が大きく向上し、同年 9 月に測風経緯儀による測風気球観測を終了した。

昭和 32 年 7 月から昭和 33 年 12 月にかけては、全世界の協力によって地球全面で同時に共同観測する国際地球観測年（IGY）が実施された。IGY では高層気象観測の観測時刻が世界的に標準化され、ラジオゾンデ観測を世界協定時の 0 時と 12 時（日本標準時では 09 時と 21 時）に実施することとなった。また、IGY 期間中は、ラジオゾンデ観測の到達目標気圧を 50hPa と定めて通常の観測よりも大型の気球を用い、特定期間には到達目標気圧を 10hPa とし、気象電気ゾンデ及び露点ゾンデといった特殊ゾンデの定期的な観測も実施する等、高層気象観測の充実が図られた。IGY ではこのほか、大気中のオゾン観測、太陽放射観測及び地球放射観測の実施が計画され、高層気象台ではこれら 3 項目全てに対応することとなった。IGY 期間終了後も現在に至るまで、ラジオゾンデ観測や様々な観測、国際比較観測、調査観測を継続して実施してきている。このように様々な観測を実施する高層気象台は、IGY をきっかけとして日本国内の代表的な高層気象官署から大気科学観測の世界的な拠点に変わっていき、世界の基準的な観測地点として観測手法の改善、標準化、人材育成に貢献する役割を持つことになった。

【第 2 節】高層気象台における観測並びに試験、調査及び研究

1. 高層気象観測

（1）高層気象観測の自動化と高度化

人工衛星の気象利用開始を背景に、WMO による世界気象監視（WWW）計画が昭和 43 年に開始され、全球観測システム（GOS）、全球通信システム（GTS）が構築され、リアルタイムでの全球の気象監視・予測のための高層気象観測の重要性が増していた。このころ、気象庁では高層気象観測の近代化計画が開始（昭和 46 年）され、観測の効率化、データの均質化、観測通報の迅速化を図るために、信号を計算機処理できる新しいラジオゾンデの開発が進められた。

その結果、昭和 56 年 3 月に変調周波数変化式レーウィンゾンデ（RS2-80 型）が採用され、

昭和 61 年にはラジオゾンデ測定信号並びに方向探知機の方位角及び高度角の角度信号の収集から各種計算処理、高層気象観測電報の作成及び送信までをリアルタイムで自動で行う、高層気象観測資料自動処理装置の運用を高層気象台で開始した。さらに、平成 4 年にはパソコンを用いる JMA-91 型高層気象観測装置が導入され、RS2-91 型レーウィンゾンデも同年から運用された。これらのラジオゾンデと観測装置の開発・導入において、高層気象台では試験飛揚の実施、新旧ラジオゾンデの連結飛揚による比較観測、日射補正式の検証を行った。

平成 5 年、WMO 第 4 回ラジオゾンデ国際比較観測が高層気象台において 1 か月にわたって開催された。我が国の他にフィンランド、米国が参加し、一日 3 回、20 日間の飛揚が行われている。各参加国のラジオゾンデにより観測された気圧・気温・湿度及び高度の比較・検証、異なるシステムによる風向・風速、風ベクトルの差の評価、指定気圧面のデータの差の定量化等が行われた。

これらの他にも高層気象台では、高層気象観測の自動化に伴うレーウィンゾンデの小型軽量化と高度化に合わせて、パラシュートの改良、巻下器の改良、ラジオゾンデの飛翔予測シミュレーションプログラムの開発、そして全国の高層気象観測に携わる職員に研修を実施するなど、日本の高層気象観測の技術センターとしての役割を果たした。また、平成 6 年 4 月から平成 9 年 3 月までの 3 年間、高層気象台は気象庁観測部・予報部・気象研究所と共同して「ウィンドプロファイラによる風観測の定常化に関する業務実験」を実施し、その成果は平成 13 年に運用を開始したウィンドプロファイラによる高層風観測網の構築に生かされた。

(2) GPS ゾンデによる高層気象観測の開始

方向探知機方式は、自官署の設備のみで観測を実施できる利点があるものの、パラボラアンテナ等地上設備が大がかりであること、低高度角にあるラジオゾンデから信号を受信する場合に電波が地面反射の影響を受けて測角精度が低下すること、観測地点近くの建物等によって電波が遮られる部分が生じることなどの弱点がある。さらに方向探知機でラジオゾンデを自動追跡して得られる航跡から、ラジオゾンデの単位時間当たり（通常 1 分ごと）の移動方向（風向）と移動距離（風速）を求める方式では、詳細な時間・高度分解能の観測値を得ることは困難である。このような方向探知機方式の弱点を解消したのが GPS 方式によるラジオゾンデ観測である。

GPS 方式の導入に際して高層気象台は大きな役割を果たした。平成 8 年のヴァイサラ社製 GPS ゾンデの試験観測、平成 9 年のヴァイサラ社製オメガゾンデと GPS ゾンデの連結飛揚試験、メソ擾乱の理解・解明のために組織された「つくば域降雨観測実験」のために平成 9 年から平成 10 年にかけて実施された GPS ゾンデ観測の支援など、数々の GPS ゾンデの飛揚を実施した。その後も様々な試験や比較観測で技術確認等を行い、平成 21 年 12 月に GPS ゾンデによる観測を開始した。このことにより方向探知機を用いた高層気象観測は、平成 22 年 10 月の比較観測を最後に終了した。

なお、GPS ゾンデを用いた観測は、当初は職員が飛揚を全て行っていたが、令和 5 年 3 月に GPS ゾンデを自動飛揚させる自動放球装置を導入した。ただし、複数のラジオゾンデによる比較観測、調査目的の観測、オゾンゾンデ観測やその他特殊ゾンデ観測では、引き続き職員により気球を飛揚する観測を継続実施している。

(3) GCOS 基準高層観測網 (GRUAN) と高層気象台

平成 2 年に開催された第 2 回世界気候会議では全球気候観測システム (GCOS) の構築が提唱され、WMO、国連環境計画 (UNEP)、国際科学会議 (ICSU)、政府間海洋学委員会 (IOC) のもとに平成 4 年に活動を開始した。GCOS は GOS などの既存の観測システムも活用した、大気、海洋、陸面及び生物圏の気候系全体を対象とした総合的な観測システムである。気候変動に関する国際連合枠組条約 (UNFCCC) は、温室効果ガスの削減だけでなく気候変動に関する研究と組織的観測についても定めており、その組織的観測を担うのが GCOS である。

GCOS は既存の GOS を活用した気候監視に耐えうる高層観測システム (GUAN) の観測点として、平成 7 年に世界で約 150 か所の高層気象観測所を選定した。日本では札幌、館野、鹿児島、沖縄 (那覇)、石垣島、父島、南鳥島、及び南極昭和基地が選定された。高層気象台 (館野) は GUAN の観測点として、平成 11 年 7 月に 5hPa まで到達することを目標とする高高度レーウィンゾンデ観測を開始した (平成 27 年 3 月に終了)。一方、UNFCCC からの要請を受けて平成 16 年に策定された GCOS 実施計画において、長期にわたる気候変動監視の基準となる高精度の高層気象観測データの取得などを目的とした観測網の確立が課題とされ、それを受け GCOS 基準高層観測網 (GRUAN) の構築が進められた。気象庁は平成 21 年に長期間の高品質な高層気象観測データを有し上層気象の精密な調査を所掌とする高層気象台を GRUAN 観測所に登録して、その構築に参加することとなった。

高層気象台は、GRUAN 観測所に必要な環境を満たす証である「GRUAN サイト認証」の取得と、気候監視の目的に適合する GPS ゾンデであることの証である「GRUAN ゾンデ認証」の取得を目指した。このうちサイト認証については、様々な観測手法による比較観測の継続的な実施など、認証に求められる厳しい要件を満たすことで、平成 30 年 4 月に取得した。令和 6 年 3 月現在、GRUAN のサイト認証されている観測地点は世界で 14 地点である。一方、ゾンデ認証については、国産 GPS ゾンデのデータ処理のアルゴリズム開発とその技術文書の作成等を行い、平成 31 年 4 月に RS-11 型 GPS ゾンデの認証を、令和 4 年 9 月に iMS-100 型 GPS ゾンデの認証を取得した。また、これらの GPS ゾンデのデータ処理センターとして、各 GRUAN サイトで行われる観測のプロダクトの作成を担っている。

高層気象台では、GCOS による GRUAN の構築以前から、ラジオゾンデ更新の際には連結飛揚による特性比較観測を実施してきた。このため、IGY 以降の 60 年間以上にわたる高層気象観測データについて、使用する測器が変更された際の器差を補正して均質化することができ、精密な長期トレンドの解析が可能となっている。また、令和 5 年 3 月に自動放球装置による観測が開始されたことに合わせて、職員により気球を飛揚する観測と同時に飛揚させる特性比較観測を実施して観測精度確保への取組が行われている。

2. オゾン層及び紫外線の観測

(1) ドブソン分光光度計によるオゾン観測

大気中のオゾン観測は、昭和 22 年以降、気象研究所とともに観測手法の開発・研究を進め、IGY の 2 年前である昭和 30 年には英国のベック社からドブソン分光光度計を購入し、これを用いて観測が開始された。最初の光度計は輸入によったが、島津製作所にも製造を依頼し、合

計 6 台を同社から購入した。これら 6 台について、高層気象台においてベック社製のものと同時比較観測を行って校正した後、昭和 33 年にかけて鳥島、南鳥島、札幌及び鹿児島へと送り、各地で観測が開始された。昭和 36 年には南極昭和基地でも観測が開始された。IGY の大きな成果の一つとしてドブソン分光光度計を用いたオゾン観測網が世界に展開されたことがあげられ、その中で南極を含め 6 地点を擁する日本の観測網は充実したものであった。

第 1 節で述べたように IGY は高層気象台の業務を大きく変えたが、この変化は昭和 50 年代後半以降に顕在化するオゾン層破壊問題への対応に生かされることとなった。昭和 49 年に、人為起源のフロンガスから放出された塩素原子によるオゾン層破壊の可能性が提起され、大きな社会問題となった。WMO はオゾン層保護の観点から、オゾン観測網の整備・充実などを骨子とする「全球オゾン研究監視計画」を昭和 51 年に立ち上げた。オゾン観測は、IGY を機に国際オゾン委員会 (IO3C) と WMO の連携のもとでドブソン分光光度計を用いた観測が世界中に展開され、昭和 30 年代の半ばまでには世界 100 地点ほどで観測されるようになっていたが、問題の一つはその標準化であった。そこで、WMO では全球オゾン研究監視計画により、米国海洋大気庁 (NOAA) のドブソン分光光度計を国際第一準器 (世界準器) とした上で、全世界を複数の地域に分け、それぞれに二次準器 (地区準器) を置き、それで地区内の測器を校正する世界標準化の体系を構築した。

(2) アジア地区準器としてのドブソン分光光度計

我が国は、昭和 52 年に米国・ボルダーで行われた世界準器との国際比較に高層気象台のドブソン分光光度計で参加し、この測器が国際二次準器 (アジア地区準器) に指定された。以後、この測器は複数回の国際比較を経て現在に至るまでドブソン分光光度計のアジア地区準器として、地区内の国際相互比較などによるオゾン観測の標準化に不可欠な測器として位置づけられている。

高層気象台ではドブソン分光光度計の開発・改良にも長年にわたって取り組み、アジア地区準器を含む気象庁のドブソン分光光度計の制御は平成 6 年から平成 7 年にかけて自動化された。この制御の自動化により誤操作や個人差が除かれ信頼性が格段に向上し、平成 7 年のスイス・アローサでの国際比較観測時には、参加した 18 台のドブソン分光光度計の中でアジア地区準器が最も近代化され、とてもよく維持管理されていると高く評価された。また、オゾンホールが発見につながる南極昭和基地における昭和 57 年 10 月のオゾン全量の大幅な低下は、高層気象台で調整しアジア地区準器で校正されたドブソン分光光度計で観測された。オゾンホールの発見は、オゾン層の破壊が現実のものであるとの認識を広め、その後のオゾン層保護の取組を加速した。この事例に代表されるように、高層気象台が地道に続けてきた観測測器の整備・調整、開発によって蓄積された高い信頼性をもつデータが果たした役割は大きい。

なお、オゾン観測に用いる測器は業務の効率化などを目的として、平成 30 年にドブソン分光光度計から全自動で観測が可能なブリュワー分光光度計に移行したが、気象庁が引き続き WMO 第 II 地区ドブソン校正センターの役割を担っていることから高層気象台ではドブソン分光光度計のアジア地区準器の維持・管理や、観測データの検証等を目的としてドブソン分光光度計による研究観測を行っている。

(3) オゾンゾンデによる観測

ドブソン分光光度計及びブリューワー分光光度計はオゾン全量観測に用いられ、また、反転観測という手法でオゾンの鉛直分布も観測することができる。しかし、それらは地上からのリモートセンシングによる観測であるため、オゾン層のより詳細な構造を測るには不十分であった。そこで、オゾン量を直接観測するためのオゾンセンサーをラジオゾンデに組み込んだオゾンゾンデが開発された。

我が国においては、昭和 30 年頃から気象研究所と高層気象台でオゾンゾンデの開発を行っていた。高層気象台では昭和 40 年に太陽光を利用する光学式オゾンゾンデによる観測を開始した後、昭和 43 年にヨウ化カリウム (KI) とオゾンの化学反応を利用する KI solution and Carbon electrode 型 (KC 型) の電気化学式オゾンゾンデによる観測を開始した。その後も KC 型オゾンゾンデは改良を重ねられ平成 21 年まで使用された。平成 21 年にオゾン変化に対する応答が速いなどの特長がある Electrochemical Concentration Cell 型 (ECC 型) オゾンゾンデに切り替え、現在に至っている。

オゾンゾンデに関してもデータの均質性確保や各測器の特性を把握するため、IO3C と WMO のもとで国際比較が実施されている。我が国も、昭和 45 年に西ドイツで開かれたオゾンゾンデ国際比較観測に参加し、以降、高層気象台も KC 型と ECC 型の特性比較や観測手順を標準化する取組に貢献している。

(4) ブリューワー分光光度計による紫外線観測

ブリューワー分光光度計は、オゾン観測のためのドブソン分光光度計の後継としてカナダ大気環境庁とトロント大学で開発された測器である。ドブソン分光光度計とブリューワー分光光度計との主な相違点の一つは、光強度の測定に前者が光学くさびを利用して二波長の光の強度比を求めているのに対し、後者が光電子増倍管を利用して光子計数方式で波長別の光強度を直接測定していることである。このため、ブリューワー分光光度計はオゾン観測のために考案されたものであるが、光学的に大きな改造を施すことなく波長別の紫外線観測に使用できる。

オゾン層破壊により地上に到達する有害紫外線の増加が懸念される中、高層気象台ではブリューワー分光光度計による波長別の紫外線観測の技術開発を進め、平成 2 年に B 領域波長別紫外線 (UV-B) の毎時観測を開始した。その後、札幌管区気象台、鹿児島地方気象台、沖縄気象台では平成 3 年、南極昭和基地では平成 6 年に観測が開始された。

高層気象台ではブリューワー分光光度計の国内準器を維持・管理しており、気象庁のブリューワー分光光度計はこの国内準器を用いて校正している。国内準器は基準ランプ点検と、世界校正センター (カナダ環境・気候変動省) の国際準器と数年ごとに比較観測を行うことで精度を確保している。

3. 日射・放射観測

(1) 日射・放射観測の開始

気象学で扱う放射は、太陽を起源とする太陽放射 (波長領域は、約 $0.4\mu\text{m}$ 以下の紫外領域から約 $3\mu\text{m}$ 以上の赤外領域まで及ぶが、一般には全エネルギーの約 97% を占める $0.29\sim 3.0\mu\text{m}$ の波長領域を日射又は短波放射という。) と、地表及び地球大気を起源とする地球放射 (長

波放射、赤外放射、又は日射と区別して単に放射ともいう。波長領域は、およそ $3 \sim 100 \mu\text{m}$ 。）に大別される。高層気象台では昭和 24 年にこれら日射・放射観測の調査及び研究を開始した。昭和 25 年頃、長波長放射量観測のため、気象研究所においてオゾン量観測用として試作された夜間放射計に改良を加え、さらに IGY に備え感雨計を利用した自動雨よけ装置を開発し、IGY 開始前の昭和 32 年 2 月に夜間における下向き長波長放射量の観測を開始した。IGY が始まった同年 7 月には全天日射量の観測を、12 月には直達日射量の観測を開始した。

高層気象台では、IGY 期間が終了した昭和 33 年以降も日射・放射に関する調査及び研究を継続するとともに、観測する項目（要素）を順次増やした。昭和 36 年には地表面反射日射量の観測と地表面放射量（上向き放射量）の観測を開始した。また、直達日射を遮断する太陽直射光遮蔽環装置を開発し、昭和 37 年には散乱日射量観測を開始した。その後、より高精度な観測機器や観測手法への変更等を行いつつ精度よく観測を継続してきた。これらの直達・散乱日射の別も含めた短波・長波放射観測は現在まで継続されており、このように長く放射観測を実施している観測所は世界的にも数地点しかなく、気候変動、地球環境の監視のために貴重な観測拠点となっている。

（２）基準地上放射観測網（BSRN）への貢献

地球温暖化予測の不確実性の原因の一つに、エアロゾルや温室効果ガスの増減が、気温を変化させる原動力である日射・放射に及ぼす影響について、十分に解明されていないことがあげられる。これらの理解を進めるため、平成 2 年に世界気候研究計画(WCRP)の全球エネルギー・水循環研究計画(GEWEX)の下に基準地上放射観測網(BSRN)が構築された。その目的は、衛星による地球監視、大気大循環モデルの開発改良、地表面放射収支の長期トレンド監視など気候変動研究に関する分野で活用される、高精度な日射・放射観測データの提供である。

BSRN 構築に先立ち、平成元年に西ドイツで開催された地球規模気候変動における地表面放射収支に関する宇宙空間研究委員会(COSPAR)/WCRP ワークショップでは、BSRN の観測点が満たすべき条件の議論が行われるとともに、各国の参加者から具体的な候補地が紹介された。我が国の参加者からは、既に多くの観測を実施しており、条件を満たしうる観測所として、高層気象台と南極昭和基地が紹介された。高層気象台では、それまで 5 秒であったサンプリング間隔を 1 秒にするなど BSRN の仕様を満たすよう準備を行い、平成 8 年から日射・放射観測値（直達日射、散乱日射、下向き長波、上向き短波、上向き長波）について世界放射監視センター(スイス連邦工科大学)へ BSRN ファイル形式による報告を開始した。平成 10 年には、高層気象台が開発した BSRN 観測点用データ処理ソフトについて、他の観測点で利用できるよう世界放射監視センターから提供依頼があり、一部改良を加え汎用化したものを平成 11 年に提供した。

また、高層気象台の調査・研究による知見と技術は、平成 6 年に南極昭和基地が、平成 22 年に札幌、福岡、石垣島及び南鳥島が BSRN の観測点としてデータ報告を開始する際にも生かされた。

現在、BSRN の観測点は世界で約 60 地点あり、そのデータを用いた多くの研究は気候変動の理解を深め、IPCC による評価にも重要な役割を果たしている。なお、BSRN の観測点の中でも直達日射量と散乱日射量の高精度な観測を IGY 以後長く続けている地点は高層気象台を

含め世界で数地点しかない。高層気象台におけるその貴重な観測データは、地表に届く日射量の十年規模の変化とそれに対するエアロゾルの直接・間接影響の評価研究にも活用された。

4. 下層大気の観測

(1) 地上気象観測

高層気象台の地において大正9年に開始した地上気象観測は、観測回数や観測項目、使用測器の変遷を経ながら継続してきている。平成2年には地域気象（アメダス）観測所「長峰」（平成13年にアメダス観測所名を「つくば」に変更。）として4要素配信を開始した。地上気象観測を行う露場の所在は、昭和48年、昭和50年にわずかな移設はあったものの、観測開始から大きく変わっておらず、観測環境が良好に維持されてきている。

(2) 係留気球観測

第1節で述べたとおり、高層気象台における係留気球による高層気象観測はラジオゾンデの観測開始に伴い昭和19年に終了したが、本庄出張所では、昭和26年、接地境界層を観測対象として係留気球による下層気象の研究観測が開始された。その後、昭和32年の本庄出張所の廃止に伴い、高層気象台に係留気球を用いた研究観測が引き継がれた。その観測頻度は昭和40年代後半から昭和50年代前半にかけては通常年間30～60回程度、昭和50年代後半には100回を超える年もあった。気象研究所や大学等との共同研究も行われ、昭和49年と翌昭和50年にはICSUとWMOとの共催の全球大気開発計画の副計画「気団変質研究観測計画（AMTEX）」の冬季観測に参加し、宮古島での観測を実施した。観測結果は大気境界層の研究や環境アセスメントの調査などに活用され、境界層構造の把握や高度断面の時系列変化の詳細、物理的現象の解明などに貢献した。また、大気汚染に関連して係留気球に気象用計器とオゾン濃度測定器を搭載した観測では、気温の接地逆転層に伴う下層オゾン濃度の汚染移流の特徴的な変化を報告した。

このような成果をあげた係留気球観測であるが、維持管理の体制、運用コスト、マンパワーの確保、安全面の対策、観測機器の老朽化、等の種々の問題があった。また、観測は研究・調査用に限られ、その頻度は平成に入り年数回と減少していた。さらに、下層大気のより詳細な観測手段として、高分解能で観測頻度の高いウィンドプロファイラ、ドップラーライダー、GPS気柱水蒸気量（可降水量）等のリモートセンシング観測が活用できるようになってきた。このようなことから、高層気象台における係留気球観測は平成25年3月をもって終了した。

(3) 地上オゾン観測

高層気象台における地上オゾン観測は、係留気球による下層気象に関する調査を出発点として昭和51年から実施された。観測成果は種々の調査研究に用いられ、下層オゾンの鉛直分布や日変化、季節変化等を明らかにしてきた。一方で大気汚染・地球環境の長期的な変動の監視に役立てるべく観測を継続してきた一面もあった。また、昭和63年以降の観測データは、WMOの全球大気監視（GAW）計画の下に設立された温室効果ガス世界資料センター（WDCGG）に報告され、現在もGAW計画の下に設立された反応性ガス世界資料センター（WDCRG）からデータが公開されている。

しかしながら、気象庁による大気バックグラウンド汚染観測の実施官署と異なり、高層気象台

は大都市の人間活動の影響を受ける立地であることや、大気汚染の監視については環境省が稠密な観測網を構築している状況もあり、高層気象台における地上オゾン観測を平成 28 年に終了することとなった。

【第 3 節】研究・調査成果の公表、普及啓発、研修の取組

高層気象台では、職員による技術開発や調査・研究等の成果を広く社会に知らせることを目的として、大正 12 年より高層気象台彙報を発行している。同書は原則として年 1 回作成し、台外の専門家の査読を経た論文・報文・解説・観測データ等を掲載している。創刊以来、印刷物として発行していたが、平成 23 年に印刷物に加えて高層気象台ホームページに電子媒体を掲載することとした。その後、電子媒体化が各所で進んでいること等を踏まえ、令和 5 年、第 77 号・78 号の合併号をもって印刷物の発行を終了し、電子媒体に完全移行した。

普及啓発活動としては、気象研究所、気象測器検定試験センターとともに、平成 4 年から「お天気フェアつくば」を開催し、オゾンゾンデ観測などの一般公開を行っている。また、平成 14 年に開設した高層気象台ホームページでは、業務の紹介・解説に加え、観測データや高層気象台彙報等を掲載している。平成 19 年には、ジェット気流の存在を世界で初めて示した大石和三郎初代高層気象台長を記念したコーナーを、老朽化した大石記念館の解体に伴い庁舎内に設置した。高層気象台の敷地内には、平成 29 年に気象測器検定試験センターが開設した気象測器歴史館がある。館内には、過去に使用していた高層気象観測用のゾンデ、風、追跡アンテナの他、気圧計、温度計、地震計等の様々な観測機器を展示しており、予約制で見学可能である。

また、高層気象台では、庁内職員に対する技術研修として、高層気象観測業務研修や日本南極地域観測隊気象庁派遣隊員の技術習得訓練の講師を担当しているほか、気象大学校大学部特修課程や国際協力機構（JICA）気象業務能力向上研修の官署見学などを受け入れている。

第4章 地磁気観測所

【第1節】地磁気観測所の沿革

1. 日本における地磁気観測

日本における地磁気観測は、明治15年に学術の発展を目的とした国際共同研究計画（第1回国際極年）への参加を契機に始まった。国内機関が臨時的に実施した地磁気観測は、その後中央気象台の正式な業務として引き継がれ、明治30年1月から江戸城旧本丸跡の中央気象台構内において本格的に地磁気観測が開始された。しかし明治末期には都市の電化による観測障害を避けて茨城県柿岡に移転することとなり、以来100年以上にわたり国際的な標準観測所として精密に地磁気の定常観測を実施している。今日、地磁気観測所の定常観測は、柿岡（茨城県）、女満別（北海道）、鹿屋（鹿児島県）のほか、小笠原諸島の父島を含めた4地点で実施し、世界の地磁気観測網の中で手薄なアジア・太平洋地域の代表的な観測を担っており、観測データは国内外で学術・教育分野のほか広く活用されている。

学術と電磁波を利用する技術の発展に伴い、地磁気の乱れが発生することで社会経済活動に様々な影響があることが認識されるようになった。とりわけ地磁気擾乱の影響を受けて通信障害、衛星の誤作動や測位（GPS）の誤差等の障害が発生すること、地磁気擾乱により誘導された地電流が送電施設に障害をもたらす停電を引き起こすことなどが知られている。平成20年、世界気象機関（WMO）は、気象インフラと人間活動に及ぼす宇宙天気の影響に着目し、気象サービスと同様に宇宙天気サービスの重要性を認定した。平成22年に、WMOは、宇宙天気サービスのための各種観測、データ交換等をサポートするための「宇宙天気に関するプログラム間の調整チーム（ICTSW）」を設立し、翌平成23年には宇宙天気の世界的な危険から社会を保護するための観測とサービスに必要なものを準備するために、WMOメンバーによる協調的な取組が必要であると認定した（「宇宙天気ハザードに対処する世界規模の準備に関する声明」）。WMOメンバーである気象庁は、地磁気観測所において地磁気観測を継続し、社会インフラへのリスクとなる磁気嵐を含む地磁気擾乱の観測を行い、世界的な地磁気データ交換を行う国際リアルタイム地磁気観測ネットワーク（INTERMAGNET）^{*1}にも参加している。安全・安心な社会経済活動に直結する社会インフラの安定運用にとってリスクとなる太陽地球圏環境変動の監視・予測を目的として、太陽活動や磁気圏・電離圏に発生する様々な自然現象（宇宙天気）の現況把握や予報について、これまで国内外で取り組まれてきた。国内においては、令和元年12月から国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）が太陽地球圏環境変動の監視とともに宇宙天気予報の24時間運用を開始し、地磁気観測所の観測成果は地磁気擾乱の現況監視及び予報に利用されている。

（*1）国際リアルタイム地磁気観測ネットワーク（INTERMAGNET）：1991年設立、誰でも無償で地磁気データにアクセスできる国際的地磁気データ交換の枠組み。

一方、地磁気観測所の定常観測データは、磁気図（日本域の磁場の分布図：国土地理院が日

本各地の地磁気観測を基に5年ごとに更新)及びIGRF(全地球的スケールの地球磁場分布を表現する国際標準磁場モデル:国際地球電磁気学・超高層物理学協会(IAGA: International Association of Geomagnetism and Aeronomy)*²の作業部会V-MODが5年ごとに更新)の作成にも利用されている。昨今のテクノロジーの進展に伴い、とりわけ偏角(真北と磁北のなす角)モデルは、磁気センサーの示す地磁気の方角を地図上の真北からの方位に補正するための情報として活用される場が増えている。例えば、建築基準法による北側斜線制限や日影規制に係る真北測量には偏角の情報が必要である。また、船舶・航空機・自動車・ドローン等の運輸全般に普及しているナビゲーション技術のほか、国土交通省が推進するi-Constructionにおけるドローンを活用した3次元測量、スマート農業におけるドローンによる農薬・肥料の散布作業等に用いられる自動制御システムにもこれら偏角モデルが搭載されている。今後社会に普及することが見込まれている車の自動運転技術にも、正確な偏角モデルが必須であり、ナビゲーション技術を支える基盤としての重要性は増しており、国土交通全般にわたる安全の確保に寄与している。このように、地磁気観測所の定常観測は、学術の発展に重要であるのみならず、現代社会インフラを支える基盤的なデータを提供している。

(*2) 国際地球電磁気学・超高層物理学協会(IAGA):国際測地学・地球物理学連合(IUGG)傘下の国際学術協会の1つ。

本節次項では、まず戦後の地磁気観測所による国際協力事業への参画について述べる。次節以降では、地磁気観測所の観測業務(第2節)と調査・研究業務(第3節)について記述する。第2節では、各官署の定常観測の成り立ち(第1項)、実際の地磁気観測に用いられる観測技術(第2項)、地球電磁気学的に地磁気観測と密接な関係が認められる地電流観測及び空中電気観測(第3項)、過去のアナログ観測時代のブロマイド記録の利用価値の拡大を図るデジタル化(第4項)、将来のデータ利活用の普及を促進するためのデータのオープンアクセスへの取組(第5項)についてそれぞれ記述する。第3節では、地磁気観測手法に関する調査研究(第1項)、地磁気観測による地震火山活動評価に関する調査研究(第2項)、南極観測事業への協力(第3項)、地磁気観測所報告及び論文刊行物等の刊行状況(第4項)についてそれぞれ記述する。

2. 国際協力事業への参画

昭和31年に気象庁の附属機関となった地磁気観測所は、翌年の国際地球観測年(IGY)に参画し、地磁気・地電流早廻し観測、地磁気変化度観測、大気伝導度観測、大気光観測を開始した。また、昭和24年に先立って地電流観測を始めていた鹿屋出張所では、IGY期間中の昭和33年に地磁気観測も開始した。以降、昭和39年の太陽活動極小期国際観測年(IQSY)における地磁気脈動(ULF)等の観測、昭和45年の太陽活動期国際観測年(IASY)における父島での地磁気観測、昭和47年の太陽地球環境国際定常監視計画(MONSEE)における父島での地磁気定常観測と地磁気脈動観測の開始、昭和51年の国際磁気圏観測計画(IMS)における柿岡での地磁気脈動(ULF)観測の定常化など、昭和期の国際観測事業への参画を契機として観測業務の拡充が図られた。

昭和47年、地磁気観測所は次期観測システム及び新標準磁気儀KASMMER(Kakioka

Automatic Standard Magnetometer)を整備し、高精度観測・デジタル収録システムを導入したことで、先進的な観測所として国際的な地位が大きく向上した。平成2年からは、5年の太陽地球系エネルギー国際共同研究計画(STEP)に参加し、観測研究及びデータベース整備への寄与を果たした。平成3年には、40年間にわたり柿岡と女満別に勤務し観測施設を維持・管理に寄与した地磁気観測所職員が、IAGAの永年勤続表彰を授与された。平成4年には、デジタル地磁気データの即時配信を促進する国際共同事業(INTERMAGNET)の認定観測所として柿岡が登録された(後に女満別と鹿屋も平成5年と平成14年にそれぞれ認定観測所として登録された)。平成16年に開催された第11回IAGA国際観測ワークショップ(日本学術会議の主催)では、地磁気観測所は柿岡の観測施設を会場の一つとして提供した。同ワークショップで行われる比較観測は地磁気観測の測器の正常動作を担保する役割を果たすものであり、地磁気観測所においては観測業務及び検定業務を根拠として比較観測へ参加した。令和元年には、INTERMAGNET事業への積極的な貢献のため、執行理事会に対し確定データの品質を管理する体制の常設を提議したところ採択を得た。その結果、INTERMAGNETに新設された多国籍チームのメンバーとなり、他の登録観測所のデータの品質チェック作業を業務として行うこととなった。令和3年には、地磁気観測所は国際業務を重要戦略として定め、これを組織的に推進するため所内に国際業務委員会を設置した。令和5年には、第21回IAGA国際観測ワークショップを柿岡に招致することをIAGAに提議し、同年のIAGA作業部会(V-OBS)会合で採決され、22年ぶり2回目となる柿岡での開催(気象庁の主催)が決定した。

【第2節】地磁気観測所における観測

1. 日本における定常観測化

(1) 柿岡

明治8年に、オーストリア海軍大尉であり北極探検家であったカール・ウィトレヒトが、極地に観測点を環状に配置して同時観測を行うことを提案したことに始まり、ローマで開催された第2回気象公会の賛成を得て、地磁気・極光・気象の国際共同研究として、第1回国際極年(1st IPY)の計画が決定した。第1回国際極年は、12か国が参加し、極地域と中緯度を含めた約40の観測所で、明治15年8月から明治16年8月まで実行された。この国際極年観測の期間にあわせて日本も観測を行えば科学の発展のために極めて有意義であろうと、日本に縁故のあるフランスの物理学者アンリ・ベクレルが、フランス駐在公使を通じて日本に参加するよう勧告したため、日本も急遽参加することが決まった。勧告を受け、日本では3つの機関(海軍水路局、農商務省地質調査所、内務省地理局と工部省電信局の共同観測機関)で地磁気観測を実施することとなった。本来であれば3つの機関で同時に地磁気観測を実施する必要はなかったが、近代化が始まったばかりの明治の日本では、役割分担について明確でなかったこともあり、指名された、又は挙手した機関全てが観測を実施することとなった。

海軍水路局では、東京麻布飯倉の観象台構内(現 東京都港区麻布台2丁目の経緯度原点が置かれている所)で、明治15年11月から明治16年10月まで地磁気3成分の観測を行った。農商務省地質調査所(現在の産業技術総合研究所地質調査総合センター)では、お雇い外国人

E. ナウマンの提案で、明治 15 年 8 月から明治 16 年 8 月にかけて、全国各地で地磁気 3 成分すべての測量を行った。内務省地理局と工部省電信局では、明治 16 年 3 月から 1 年間、工部省用地のあった麻布今井町 42 番地（現 東京都港区六本木 2 丁目 1 番地のアメリカ大使館職員宿舎用地のある小高い丘）の敷地内に「磁気試験所」を設立し、地磁気 3 成分の観測を実施した。この磁気試験所における地磁気観測は、そのまま東京気象台（地理局内）に引き継がれ、明治 19 年 3 月まで観測は継続された。明治 19 年から明治 23 年に行われた組織改編により、地理局の 1 部署であった東京気象台が「中央気象台」として独立したことを契機として、地磁気観測が中央気象台の正式な業務となり、地磁気観測は江戸城旧本丸跡の中央気象台構内へと移転することとなった。

移転してからは観測の困難さから、中央気象台（構内）において本格的な地磁気観測が開始されたのは、明治 30 年 1 月からであった。しかし、明治末期には、東京市内電車による人工擾乱による観測障害が生じたため地磁気観測精度の精密化が実現できなくなっていた。また、東京帝国大学（現 東京大学）でも磁力実験に支障が出始めており、当初は中央気象台と東京帝国大学の強い申し入れで両地点附近の電車路線の敷設は規制されていたが、明治 45 年には東京市電気局による神田区一橋通り路線の市電運転計画により、地磁気観測施設の移転要請があった。中央気象台・東京帝国大学・東京電気局三者の協議の結果、中央気象台の地磁気部門の移転決定・移転地の選定・施設の建設・磁力計の移転・設置がなされることとなり、東京帝国大学も磁力実験用の土地を他に求めることとなった。紆余曲折を経て、移転先は茨城県の柿岡（現 石岡市）となった。

大正 2 年 1 月 1 日から、柿岡において、地磁気の観測が開始され、大正 13 年には国際測地学・地球物理学連合（IUGG: International Union of Geodesy and Geophysics）の会議にて国際的な標準観測所に指定された。昭和 48 年 1 月には IAGA 総会の決議によって、柿岡は地球を取り巻く赤道環電流の強さを表す指数（Dst 指数）を決定するための、世界で 4 か所の地磁気観測所の一つとして指定され、国際的に重要な観測所となった。また昭和 27 年に制定された気象業務法により、地磁気測器の検定は委託検定業務として地磁気観測所が行うことが義務付けられ、日本で唯一の磁力計・羅針盤・磁気センサー等の検定機関となった。主に民間から預かった測器に関して検定を実施して基準に合格した場合は検定証を発行する委託検定業務と、気象庁部内からの検査依頼に基づき実施し部内検査証を発行する部内検査業務の 2 本の柱で業務を行っている。

（2）女満別と鹿屋

昭和 24 年には、女満別と鹿屋に出張所が正式に発足した。昭和 27 年 1 月から女満別出張所において、地磁気観測を開始した。女満別出張所は、高緯度の地磁気変化の観測を目的として第 2 回国際極年をきっかけに設置された、樺太（現 ロシア・サハリン）の豊原地磁気観測所の後継としての位置づけで、発足当時は地電流の観測のみであったが、翌年の昭和 25 年から地磁気観測及び空中電気観測を開始している。昭和 44 年に IAGA 総会の決議にて、南北半球規模の地磁気活動の強さを表す指数（am 指数）を決定する世界 21 か所の地磁気観測所のリストに入った。

一方、鹿屋出張所は地震予知を目的とした地電流観測のための施設であったが、昭和 32 年

の国際地球観測年（IGY）に合わせて、昭和 33 年 1 月から地磁気観測を開始した。昭和 50 年に IAGA 総会の決議にて、鹿屋は、（磁気嵐等が後続する）太陽風による磁気圏圧縮を示唆する急な地磁気増加を示す指数（SC 指数）を決定する世界 45 か所の地磁気観測所のリストに入った。

柿岡とともに、女満別及び鹿屋についても日本の北方及び南方の地磁気変化の基準となる国際的に重要な観測点であり、日本国内においては、柿岡、女満別及び鹿屋の 3 か所が INTERMAGNET の観測所に認定されている。平成 22 年まで女満別・鹿屋ともに出張所という体制で 6～7 名の職員が常駐し地磁気・地電流・空中電気の観測を実施していたが、より効率的な観測体制をとることとなり、平成 23 年 4 月から両出張所は無人化され、それぞれ女満別観測施設、鹿屋観測施設と改められた。比較的近くにある網走地方気象台及び鹿児島地方気象台に、職員が 1 名常駐し定期的な絶対観測及び機器保守を実施し、現在まで観測を継続している。

（3）父島

太陽活動期国際観測年（IASY：1969 年～1971 年）を契機に昭和 45 年 11 月から小笠原諸島父島で地磁気予備観測を開始した。その後、太陽地球環境国際定常監視計画（MONSEE：1972 年～1979 年）に父島は観測点として、柿岡、女満別、鹿屋と一緒にその役割を恒久的に分担することになり、昭和 48 年 1 月から地磁気観測が開始された。以来、地磁気観測所は 4 観測点で定常観測を行っている。

2. 地磁気観測所における絶対観測及び変化観測

（1）地磁気観測方法

地磁気観測は、地磁気変化を自動で観測する変化観測と、それを較正するための絶対観測から成り立っており、大正 2 年の柿岡での地磁気観測開始から 110 年にわたり同じ方式で行っている。

変化観測は、吊り磁石磁力計やフラックスゲート磁力計などの機器を使用し、地球磁場の連続的な変化量を測定する観測である。時間変化による地球磁場の変化量を連続して観測することができるが、絶対値は測定できない。また、観測測器の温度依存性や傾斜変動の影響により、測定値が変化することがわかっている。

絶対観測は、地球磁場の方向（偏角、伏角）及び大きさ（全磁力）の絶対値を正確に測定する。磁場の大きさは、核磁気共鳴を利用したプロトン磁力計を用いて測定し、磁場の方向は、磁気儀とよばれる非磁性の経緯儀を用いて地磁気の偏角及び伏角を測定する。磁気儀を用いた角度測定は、磁性の問題から自動化が困難で、現在も手動で行われている。

絶対観測は、変化観測の誤差が許容範囲内に収まる頻度で行われ、柿岡では 1 週間に 1 回程度の頻度で絶対観測を行っている。このことにより、連続した地磁気の絶対値を得ることが可能となる。

現在、柿岡での角度測定は昭和 46 年に測器舎によって製作された角度測定器 DI-72 を 50 年以上にわたって使用している。女満別観測施設、鹿屋観測施設及びその他観測点における角度測定は、東ドイツカルツァイス社製の非磁性セオドライト（経緯儀）に一軸のフラックス

ゲート磁力計を載せた DI メータ（地磁気観測所では FT 型磁気儀と呼ぶ）を使用している。

全磁力観測については、柿岡比較校正室に設置しているプロトン磁力計 PM-216 を基準器として、器差検定されたプロトン磁力計を仲介して各観測点で測定している。

（2）地磁気変化観測測器の遍歴

日本における地磁気変化観測の始まりは、明治 21 年に中央気象台東京観測所でのマスカー式変化計を用いた変化観測である。マスカー式変化計は吊り磁石式で、鏡を取り付けた磁針を糸でつるし、鏡に当てて反射した光源の反射光を印画紙に記録する測器である。当時の観測記録は残念ながら大正 12 年に発生した関東大震災による火災により焼失している。

地磁気観測が柿岡地磁気観測所に移転し本格的な観測が開始された大正 2 年には、エッセンハーゲン型変化計（以降エッセンハーゲン型という）がドイツから購入され採用されている。エッセンハーゲン型は基本的な原理はマスカー式変化計と同じ吊り磁石式の変化計^{*3}である。

（*3）吊り磁石式磁力計：ガラス糸で吊り下げられた磁石と反射鏡及び光源のセットで構成され、光源からの光を磁石の吊具に取付けられている鏡に当て、その反射光を回転ドラムの感光紙に受けて写真記録する磁力計。

大正 2 年 9 月に発生した関東大震災後の復旧にあわせ、エッセンハーゲン型の改良型である、エッセンハーゲン・シュミット型変化計（以下「シュミット型」という）が導入されている。シュミット型は、エッセンハーゲン型と比較し水平成分の感度が大幅に上がっているものの、観測値の温度依存性も大きくなっており観測精度そのものはエッセンハーゲン型とそれほど変わらなかったらしい。結局シュミット型が正式に採用されたのは、昭和 7 年になってからである。

戦争の影響により、長らく地磁気観測測器の更新も停止していたが、昭和 26 年に柿岡地磁気観測所でシュミット型を改良した KM 型変化計（水平成分観測用）及びワトソン式横吊変化計を参考にした KZ 型変化計（鉛直成分観測用）が製造された。KM 型及び KZ 型は吊り磁石式の変化計であるが、地磁気観測所の職員である久保木忠夫氏が開発した整磁合金を使用し、安定度・感度が大幅に向上している。KM 型及び KZ 型変化計はその後も改良を重ね、吊り磁石式変化計の観測が終了する平成 5 年まで使用されている。

昭和 45 年には観測データの精度向上だけでなく、高サンプリングのデジタルデータの取得を目的とした地磁気観測システム KASMMER が計画され、2 年後の昭和 47 年に完成している。KASMMER では、全磁力連続観測用の光ポンピング磁力計に成分観測用の補償磁場を印加することにより地磁気成分観測を実施するベクトル-プロトン方式という観測手法が採用された。KASMMER の導入により全世界の観測所に先駆けて毎分サンプリングでのデジタルデータ取得が可能となり、柿岡地磁気観測所の観測データの品質は世界トップレベルに向上した。KASMMER で採用されたベクトル-プロトン方式による地磁気成分の連続観測は、平成 2 年に全磁力計をオーバーハウザー磁力計に変更して、その後も運用が継続されたが、近年ではその役割が既に後述のフラックスゲート磁力計に置き換わっており、令和 8 年に退役することが確定している。

一方、1960 年代には新たな変化計としてフラックスゲート磁力計が登場した。フラックス

ゲート磁力計は高透磁率鉄芯の磁気ヒステリシス特性を利用した磁力計で、センサー部は鉄芯棒に励振コイル及び検出コイルを巻いた単純なつくりで、鉄芯棒が向いている方向の磁場を検出することができる。通常センサーとなる鉄芯棒を3軸直交させて、地磁気3成分の変化量を計測する。柿岡地磁気観測所では昭和38年頃から、遠隔観測点や試験観測点での連続観測用として使用を開始している。当時は計測値の温度依存性が非常に大きく、観測精度は吊り磁石式磁力計より劣っていたが、1980年代には吊り磁石式に劣らない精度のフラックスゲート磁力計が登場してきた。

平成2年に吊り磁石磁力計よりもはるかに高精度の高感度フラックスゲート磁力計が島津製作所により製造された。この高感度フラックスゲート磁力計の登場により、これまで0.1nTであった最小分解能は0.01nTに、データサンプリングも1秒から0.1秒に向上した。

高感度フラックスゲート磁力計は平成4年に正式に採用された。このことにより、100年以上続いた吊り磁石式磁力計による変化観測は平成5年に長い歴史の幕を下ろした。現在も、平成23年に更新された2代目の高感度フラックスゲート磁力計が変化観測の主磁力計として使用されている。

(3) 地磁気絶対観測測器の遍歴

日本における本格的な地磁気観測は第1回国際極年(1st IPY)に開始された。地磁気観測百年史によると、この時に日本で初めて絶対観測が実施されたようである。使用した測器の詳細は不明であるが、デクリノメータ・インクリノメータと呼ばれる自由に回転する吊り磁石の向きを直接読み取る方式の物であったと推測される。

明治21年に中央气象台で定常的な地磁気観測を開始した当初も、第1回国際極年で使用された絶対観測測器とほぼ同じものが使用されていたようであるが、明治30年に東京帝国大学の田中館愛橘博士が考案した田中館式磁気儀が東京観測所に導入され、大正元年の柿岡移転まで使用されている。

大正元年の地磁気観測所の柿岡移転にあわせて絶対観測測器も更新された。絶対観測測器はウィルド・エーデルマン型磁気儀(偏角測定)及びエーデルマン型アースインダクタ(伏角測定)をドイツから購入し採用された。両測器は柿岡での地磁気観測が本格的に開始された大正2年から正式採用されている。

大正12年9月に発生した関東大震災により、柿岡地磁気観測所の観測施設も大きな被害を受け、大規模な復旧作業が必要となった。この復旧にともない、観測機器の大規模な更新が計画され、昭和3年に初代地磁気観測所所長である今道周一がドイツへ留学し、磁気儀の操作方法及び検定方法の技能習得したうえで、シュミット型磁気儀が導入されている。

一方、同時期に日本国内において、海軍水路部が独自に新しい磁気儀を開発している。この磁気儀は当時水路部が実施していた全国の磁気測量のために携帯型として開発されたもので、水路部型磁気儀と呼ばれている。昭和4年に柿岡地磁気観測所で比較観測を実施し非常に良好な結果が得られ、昭和9年に実施された水路部による第3回全国磁気測量から使用されている。水路部型磁気儀は高精度でありながら操作性にも優れており、のちに柿岡地磁気観測所や女満別出張所でも使用されるようになった。

昭和22年、地理調査所(現 国土地理院)により磁気測量用のGSI型磁気儀の開発・試験

が始まり昭和 24 年に完成した。柿岡地磁気観測所でも昭和 23 年の試作の段階から水路部型磁気儀と並行して GSI 型磁気儀が使用されている。

磁気測量用の磁気儀は水路部及び地理調査所により、高精度の新しい測器が開発されていたものの、定点観測用の磁気儀に関してはシュミット型磁気儀以降新たな測器が開発されていなかった。地磁気観測所では昭和 25 年頃から高精度の定点観測用磁気儀の調査、開発を開始し、昭和 31 年に A-56 型及び H-56 型磁気儀が完成した。A-56 及び H-56 型磁気儀は地磁気観測所を中心として、専門メーカー十数社の援助・協力を得て作成された当時の技術としては画期的な性能をもつ純国産の磁気儀であった。

1950 年代後半に、これまでの地磁気観測測定原理とは全く異なる弱磁場中でのプロトンの歳差運動を応用したプロトン磁力計が登場した。プロトン磁力計は全磁力のみではあるものの、非常に手軽に高精度な全磁力絶対値を測定できる画期的な測器である。国際的にもプロトン磁力計を全磁力観測の基準器とすることが決議され、柿岡地磁気観測所でもプロトン磁力計を全磁力の基準器として使用している。

1960 年代後半になると、A-56 型磁気儀も老朽化により機構部の損傷が激しくなり、次期磁気儀の開発設計が必要となった。昭和 45 年に A-56 に替わる磁気儀の開発だけでなく、総合的な地磁気観測システムの開発を目的に KASMMER が 2 年計画で計画され、昭和 47 年に完成整備された。この時整備された磁気儀が DI-72 型磁気儀である。DI-72 型磁気儀は従来の磁気儀がサーチコイルの回転軸方向により地磁気の方角を求めていたのに対し、ヘルムホルツコイルにより自然磁場をほぼ消去して、その消去磁場の方向で地磁気の方角を決定する方式が採用された。この方式により、サーチコイルの回転軸の揺らぎによる誤差が軽減され、従来の磁気儀よりはるかに高い精度での観測が可能となっている。DI-72 型磁気儀は観測精度、動作安定性ともに最高水準の磁気儀となっており、信号検出表示パネル等の周辺機器の更新や完全分解によるメンテナンスを経て、現在も現用の基準磁気儀として 50 年以上使用されている。

1990 年代前半になると、従来のサーチコイル式の磁気儀ではなく、非磁性の測量用経緯儀の上に 1 軸のフラックスゲート磁力計を取り付けたタイプの磁気儀 DI メータが登場してきた。DI メータは地磁気観測所では FT 型磁気儀と呼び、フラックスゲート磁力計の出力が 0 になる、すなわち地球磁場と直交する方向を読み取ることで、地磁気の方角を測定することができる。FT 型磁気儀は小型で携帯性にも優れており、1990 年代以降全世界で広く使われるようになった。地磁気観測所では女満別、鹿屋及び父島の各観測施設における定点観測用の磁気儀として使用されているだけでなく、火山における臨時的な絶対観測でも FT 型磁気儀が使用されている。

3. 地電流観測・空中電気観測

(1) 地電流観測

19 世紀中ごろ、電信線に不規則な電流が時折現れることで、地殻中を流れる電流があることが初めて認識された。1859 年 8 月に極めて顕著な磁気嵐（「キャリントン・イベント」と呼ばれる）が起り、世界中の通信線による通信は地電流により著しい障害を受けた。この出来事により地電流の研究に拍車がかかった。地殻中を流れる電流を直接測定することは難しい

ため、一般的には地面に埋められた 2 つの電極間の電位差が測定される。このような観測を地電流観測と呼んでいる。地電流は地磁気変化や地殻の活動などの自然変化に伴って変化することから、地下構造探査はじめ様々な分野で利用される。

我が国の地電流観測は、第 2 回国際極年中に豊原で開始した。第二次世界大戦後、施設は移転され、豊原観測所は旧ソ連に引き渡されたため、終戦後約 1 年を経た昭和 21 年 8 月に豊原の後継として、幾寅地磁気観測所が北海道空知郡南富良野村に設置され、同年 11 月から地電流観測を開始した。しかし、同地は地磁気観測に不適当な場所であることがわかったため、昭和 24 年 11 月に地磁気観測所女満別出張所に移った。

一方、終戦直後、地電流の局地性の調査とその結果を地震予知に応用する目的で、昭和 21 年に尾鷲、原町、都城測候所及び盛岡産業研究所内に地電流観測施設を設け、試験観測を開始した。都城の観測は市街地に近く人工擾乱が大きかったので、昭和 23 年 9 月に鹿児島県鹿屋市に移設された。翌年 6 月から鹿屋・原町はそれぞれ地磁気観測所鹿屋・原ノ町出張所となり、正式に地電流観測を開始した。しかし、尾鷲・盛岡は昭和 26 年に、原ノ町は昭和 32 年にそれぞれ廃止された。

女満別・鹿屋両出張所は平成 23 年に無人化されるも地電流観測は継続され磁気嵐発生時の地電流変化と地磁気誘導電流（GIC）が電力網に与える影響など災害軽減に向けた知見も得られたが、令和 3 年 2 月に柿岡地磁気観測所、女満別・鹿屋両地磁気観測施設で行われていた地電流観測は終了した。

（2）空中電気観測

地球の大気中には雷の放電などの電気に関係した現象が見られ、晴天時でも大気中には電場が存在している。この電場の観測を空中電気観測と呼んでいる。

東京気象台で明治 8 年 6 月から空中電気観測を開始した。明治 15 年に移転のため観測中止されたが、明治 21 年に麹町区旧本丸桔梗門^{ききよう}で観測が再開された。しかし、東京での観測は大気汚染のため明治 36 年に中止された。その後、大正元年に地磁気観測施設が柿岡に移転し、昭和 4 年から柿岡で空中電気観測が再開された。

第 2 回国際極年をきっかけに、昭和 7 年に豊原でも空中電気観測を開始した。第二次世界大戦後、豊原観測所は旧ソ連に引き渡された。昭和 21 年、北海道の幾寅に新しい観測所が設立されたが空中電気観測は行われず、昭和 24 年に女満別出張所にて空中電気観測を再開した。

工業の発展やモータリゼーションの発達によって発生した大気汚染物質（凝結核）の影響や大気圏内での核実験など（福島第一原子力発電所の事故も含む）で発散された降下性放射性物質による影響が観測されるなど、人間生活環境の変化をとらえ続けてきたが、女満別出張所での空中電気観測は平成 22 年 12 月に、柿岡地磁気観測所での同観測は令和 3 年 2 月に終了した。

4. ブロマイドのデジタル化

気象庁が保有する紙に記録された気象資料を学術及び防災に役立たせる目的でデータベース化（デジタル化）を進める取組は 1990 年代から全庁的に図られてきた。柿岡に移転した地磁気観測所においても大正 2 年 1 月の観測開始以来、アナログ観測による地磁気データを収集してきた。地磁気観測のアナログ記録（アナログマグネトグラム）は、柿岡では大正 13 年か

ら平成7年、女満別では昭和25年から平成9年、鹿屋では昭和33年から平成8年にかけて存在する。観測開始当初は、東京に感光印画紙（ブロマイド）を配送して現像処理、手作業による毎時値の読取りから資料の保管まで行っていたが、大正12年に起きた関東大震災の最中に資料が全て焼失したため、その後は柿岡に職員を駐在させて地磁気観測所の全ての作業を行うようになった。アナログ観測では、温度変化を防ぐために土盛りした石室の暗室にて、吊り磁石式変化計を配置して、地磁気3成分の変化量をブロマイドに記録していた。地磁気観測所においては、昭和51年からデジタル収録を導入後も並行観測の必要性からアナログ観測を継続していた。1990年代に入ると、世界の地磁気観測所ではアナログ観測が減少しデジタル観測が過半数を超えるようになったこともあり、地磁気観測所のアナログ観測を終了した。

2000年代に入ると、地磁気観測所でもアナログマグネトグラムを過去から未来への遺産として見直す機運が高まり、適切にデジタル処理を施せば、全世界的に地磁気が増加する磁気嵐や地球磁気圏で突発的に発生するサブストームなどオーロラ発生に関係する地磁気現象の調査研究への活用や、衛星時代前の太陽地球圏環境の推定に役立つなど応用範囲が広く利用価値が高い毎分値へと変換できると期待されたため、ブロマイドのデジタル化について検討が始まった。平成19年度の予備的調査の後、平成20年5月に開催された所内の調査研究委員会^{*4}にて、調査研究課題「地磁気ブロマイド記録のデジタル毎分値化に関する調査」が承認され、調査研究に着手した。ブロマイドを高精度にスキャンし画像化したデータから記録線をオートトレースにより数値化するプログラムを内製し、世界初となるアナログマグネトグラムからの地磁気の毎分値の自動読取りに成功した。平成21年4月発行の地磁気観測所ニュース No.30にて成果報告の記事を掲載し、平成23年に世界の研究者に向けて ICSU World Data System Conference にて成果発表を行った。これらの発信が WDC 京都^{*5}の目にとどまり共同研究の誘いを受け、これを受けて平成24年から平成26年度まで WDC 京都との共同研究により画像スキャン作業の効率化を進め、数値データの読取り作業を推進した。以降、平成26年度には「地磁気ブロマイド記録のデジタル毎分値化」、平成28年度には「地磁気ブロマイド記録のデジタル化」と名称を変更して調査研究課題として継続し、ブロマイドのデジタル化が推進された。調査研究の進捗として、数値データの読取りプログラムの改良が進められ、アナログ観測と光ポンピング磁力計を用いたデジタル観測の並行期間を利用して、アナログ観測から読み取った毎分値がデジタル観測値とほぼ等しいことが確認された。さらに、時間分解能を30秒に上げて比較検証した後、磁場入力に対する吊り磁石式磁力計の針の振動の減衰時間を調査する実験を通してブロマイド画像データから読み取られる最小の時間間隔は7.5秒とするのが妥当であることを検証した。

（*4）調査研究委員会：所長が委員長であり、課長、主任研究官で構成され、地磁気観測所の実施する調査研究に関して、計画及び実施に関する審議を行う。令和2年に調査研究課長会へ任務が引き継がれる。

（*5）WDC 京都：京都大学が運営する地磁気世界資料センター（World Data Center for Geomagnetism, Kyoto）であり、世界の地磁気データの取集等の業務を行う。

地磁気ブロマイド記録デジタル化の利点は、学術においては、磁気嵐、地磁気脈動 $\pi 2$ 等の地磁気現象の発生に焦点を当てる太陽地球圏環境の調査にアナログ観測時代のデータが活用できるということがあげられる。一方、防災の観点からも、磁気嵐に伴う誘導電流がもたらす社

会インフラへの被害を軽減する方策に寄与するために、アナログ観測時代に発生した磁気嵐の調査にもブロマイドのデジタル化データは有益とされる。ブロマイドのデジタル化の成果還元として、平成 25 年 3 月からブロマイド記録からの地磁気毎分値の web 公開を開始した。また、平成 27 年 3 月からアナログ印画紙記録像の web 公開を開始した。さらに、平成 29 年 3 月から地磁気ブロマイド記録から求めた地磁気 7.5 秒値の web 公開を開始した。

令和 3 年 4 月に調査研究課題としての推進は終了し、改めてブロマイドタスクチームとして国際業務委員会の下に国際業務の一環としてブロマイドの読取り作業を継続することを地磁気観測所課長会にて決定した。その後ブロマイドタスクチームは、令和 4 年度 4 月から国際業務委員会の下から離れて各委員会と同じ並びで設置され、引き続きブロマイドからデジタル化の作業を継続している。令和 5 年度末現在、アナログ印画紙記録像は柿岡の大正 13 年(1924 年)から昭和 58 年(1983 年)までと、女満別・鹿屋の昭和 37 年(1962 年)から昭和 59 年(1984 年)までを、数値データは柿岡の昭和 31 年(1956 年)から昭和 58 年(1983 年)までと、女満別・鹿屋の昭和 42 年(1967 年)から昭和 59 年(1984 年)までを web 公開している。

5. データのオープンアクセス

1990 年代に、世界知的所有権機関(WIPO: World Intellectual Property Organization)が、著作権と同様にデータベースにも独自の権利を国際的に立法化しようとした動向に対して、国際学術会議(ISC: International Science Council)は、科学の発展に対して悪い影響を与えるおそれがあることを警告した。これに続き、IAGA は平成 11 年 7 月総会の決議 No.5 の中で、各国機関が所有する地磁気データベースへのフリーアクセスを保証するために、次のような勧告を各国の国内委員会^{*6}に向けて発信して、WIPO の動向に反対した。

(^{*}6) 国内委員会：日本国内では主に学術の委員会相当が該当。

『IAGA は、科学研究の進歩と科学教育の促進のためにデータベースへのフリーアクセスを保証することの重要性を認定し、データベースへのフリーアクセスを保証するように働きかけることを勧告する。また必要があれば、データベースへのフリーアクセス・ポリシーを保証するために、当局機関に対して法的措置を講じるように助言されたい。』

このような国外の動向を受けて、平成 13 年 10 月には日本学術会議も、研究や教育のための意見やデータの自由な交換についての原則を確認した上で、この独自の権利を導入することは学術の発展という観点から反対であり、法制化の動向には慎重な対応が必要であるとの声明を発表した。平成 28 年には、第 5 期科学技術基本計画が閣議決定され、「第 4 章科学技術イノベーションの基礎的な力の強化」における知の基盤の強化として、公的資金の研究成果(論文、観測データ等)の利活用の拡大のために、オープンサイエンスの推進体制の構築が謳われた。これに続く統合イノベーション戦略 2021 及び 2022 においても、引き続き研究データ基盤システムを用いた研究データの管理・利活用の推進が謳われた。その取組として、地磁気データを管理する地磁気観測所においてもデータ基盤システムの構築が推進されてきた。

地磁気観測所は、INTERMAGNET に平成 4 年 12 月から参加しており、世界の地磁気観測所のデータのユーザーに対しては早くからオープンアクセスについて対応してきた。しかし、

平成 11 年の IAGA 決議 No.5 を受けて、もっと広く観測データを研究や教育に寄与するために対応策を検討することとなった。平成 13 年 4 月から調査研究委員会にて調査研究課題「ホームページによる広報のあり方についての調査」の実施計画が承認され、地磁気観測所のホームページについて構成が検討され作成に取り組んだ。その後、調査課においてホームページ用データ表示ソフトが開発されるなど、ホームページから利用可能なサービスの高度化が図られた。平成 15 年 12 月に調査課において「観測データのインターネットで提供する新業務について」の検討が進められ、地磁気観測所のホームページ上でデータを公開する是非について本庁観測部管理課との調整を経て特段の問題がないことが確認された。翌平成 16 年 1 月から地磁気観測総合処理装置^{*7}の中に構築した所内ホームページにおけるデータ検索ページのダウンロード機能により一般ユーザーに向けたオープンアクセスを開始した。現在、月ごとに確定値の公開を実現しており、今後令和 7 年 3 月までには地磁気観測総合処理装置の更新を行い、もっと迅速な研究利用のニーズに対応するためにリアルタイムの暫定値にもアクセスできるように機能を拡充させる計画である。また、地磁気観測所テクニカルレポートについては平成 15 年 3 月からホームページにて公開を開始した。

(※7) 地磁気観測所（柿岡、女満別、鹿屋、父島の定常観測及び火山での調査観測等）の観測データを収録、処理、解析、公開するシステム。

一方、令和 3 年 4 月に当所職員が地磁気観測所保有の地電流及び空中電気の記録に関する論文投稿を計画していたが、論文に引用するデータには DOI（デジタル・オブジェクト識別子）付与の条件が付く近年の潮流による投稿規定があり、地電流及び空中電気のデータに DOI を付与する必要が生じた。これをきっかけに、当所で web 公開している地磁気、地電流及び空中電気のデータについて DOI を付与することが検討された。DOI 付与については、国内の DOI 登録機関であるジャパン・リンク・センター（JaLC）への登録作業が必要であった。令和 3 年 6 月までに、JaLC 正会員として地磁気を含む宇宙天気関連データの DOI 登録を取りまとめる情報通信研究機構（NICT）の下で準会員となることにより会費を分担せず登録を行うことが NICT の厚意により承諾された。その後、DOI に詳しい大学等関係機関から DOI に関する基礎的知識の提供を得て、各種データセットのメタデータを指定フォーマットで作成する作業を進めた。それらメタデータを NICT 経由で JaLC に提出することで、令和 3 年 9 月には、先行して登録作業を行った地電流及び空中電気データへの DOI 付与は完了し、投稿論文は無事受理された。また、令和 4 年 1 月までに、地磁気観測所が公開する確定データへの DOI 付与を全て完了した。令和 4 年 1 月に、地球電磁気・地球惑星圏学会（SGEPSS）の掲示板に地磁気観測所データ・リポジトリ「デジタルデータサービス」に DOI が付与されたことを周知した。

【第 3 節】地磁気観測に関する調査・研究

1. 地磁気観測手法に関する調査研究

前節第 1 項に述べたとおり、地磁気観測は、地磁気変化を自動で観測する変化観測と、それを較正するための絶対観測から成り立つ。変化観測は自動化が進んできているが、絶対観測については手動操作で測定を行っており手間がかかる。絶対観測の省力化は大きな課題であり、

色々な手法が検討されてきた。日本で地磁気観測が始まって以来、長らく西洋の磁力計を輸入して正規の測器として採用していたが、昭和 26 年には柿岡地磁気観測所は吊り磁石式の変化計である KM 型変化計（水平成分観測用）及び KZ 型変化計（鉛直成分観測用）を独自製作した。昭和 47 年に完成した KASMMER では、全磁力連続観測用の光ポンピング磁力計を用いて地磁気の成分観測を可能にするベクトル-プロトン方式という観測手法を導入した。ベクトルプロトン方式では、本来は成分測定ができない全磁力測定器を用いて成分計測を可能にするため、観測成分に直交する磁場成分を非常に小さくする（水平成分を計測する場合は鉛直成分に、鉛直成分を計測する場合は水平成分に）補償磁場を全磁力計感部に印加する。原理的には、補償磁場を発生させるコイルの傾斜と電流量を適切に制御することで、地磁気成分の絶対値が得られる。そこで、ベクトルプロトン方式を用いることで絶対観測の自動化が実現できないかについての検討が行われた。昭和 62 年には、女満別で設置されたベクトルプロトン方式の磁力計による絶対観測と、角度測定器とプロトン磁力計を用いて従来行われてきた絶対観測とを比較した結果が女満別出張所より報告された。平成 19 年 11 月には変化観測と共に絶対観測の自動化を実現するために、ベクトルプロトン方式を用いた地磁気 3 成分の自動計測手法について以下のような調査研究の結果が報告された。この補償磁場を発生させるコイルの傾斜量の時間変動の把握・制御が困難であるため計測誤差が生じた。一方で、直交する 3 軸磁場補償コイルを用いて自然磁場に幾通りかのパターンで人工磁場を加えたときの全磁力値を計測し、地磁気成分値及び磁場補償コイルの傾きを変数として取り込んで計算する方法について調査した結果、全磁力測定器や補償電流の分解能及び安定性などが十分に精度を満たしている前提が成立すれば、現在使用している磁気儀による絶対観測に相当する精度で地磁気 3 成分値の絶対値を計測できる可能性が指摘された。これを受けて更に調査研究が進められ、ベクトルプロトン方式においては絶対観測の観測頻度を上げることにより変化計基線値の安定性・信頼性向上の可能性も期待されたが、実用化には更なる調査研究が必要であることが平成 26 年 3 月に報告された。

近年、ベクトルプロトン方式と並行し、偏角（D）と伏角（I）を計測する方式の絶対観測を完全自動化する観測装置の開発が進められている。ベルギー王立気象局は、非磁性の超音波モーターとロータリーエンコーダーを搭載した自動化装置（AutoDIF）を開発し、当所の協力により柿岡の地磁気観測所において長期（平成 26 年から 3 年間）の評価試験観測を実施した。その結果、方位標の視準を代用するレーザー方位角測定の精度が不十分であり、当所の観測精度基準を満たすには更なる改良の必要性が指摘された。AutoDIF の改良はその後も重ねられているが、現時点では絶対観測の自動化を実現するには至っておらず、FT 型磁気儀を用いた手動での地磁気絶対観測が主流である。

FT 型磁気儀を用いた絶対観測では、「ゼロ磁場方式」と呼ばれる従来の角度測定による手法が伝統的に採用されていたが、これには観測者の繊細な手技と完全非磁性な状態での観測が要求され、習熟には一定の時間を要する。一方、近年欧米では、この従来の手法に代わり、観測者に技術的な負荷があまりかからない絶対観測手法が用いられるようになった。当所で「弱磁場方式」と呼ぶこの手法では、ゼロ磁場方式のように全て手動で厳密な角度測定の操作を行う必要はなく、真値にある程度近いところまで操作してから最後は理論計算により測定値を決定

する。一般的にゼロ磁場方式よりも弱磁場方式のほうが観測時間を短縮できるため、磁場変動が激しく素早く絶対観測をする必要のある高緯度では、弱磁場方式にメリットがあることが知られている。平成 31 年 3 月に当所職員がドイツのニーメック地磁気観測所での研修を経て弱磁場方式の観測技術を習得し、平成 31 年から令和 2 年にかけて所の調査研究課題として弱磁場方式の検証のための調査を実施した。その結果、父島のような離島の無人観測点や南極昭和基地のように環境が過酷な観測点における出張観測においては、観測者が 1 人でも測定が容易であり観測時間が短い弱磁場方式を活用するという選択も可能になった。中緯度に位置する当所の観測所においては、弱磁場方式を導入するメリットは必ずしも大きくなく、測定方式の変更に伴うデータの連続性への影響のリスクを回避し、従来どおりの観測精度を確保するためにゼロ磁場方式による絶対観測を継続することとした。

一方、地磁気の精密観測にとっては、観測障害となる車両等が原因で発生する地磁気の人工擾乱が観測値に及ぼす影響量を的確に把握することが必要であった。従前から監視カメラにより車両等を監視して、構内に設置した複数の比較観測点を用いて人工擾乱を受ける前後の地磁気の差分から擾乱量が手作業により見積もられていたが、平成 14 年に影響量の客観的な評価のため人工擾乱源を磁気モーメントとみなして構内の複数の磁力計観測点から擾乱量を推定するための調査に着手し、平成 18 年に業務用ソフトウェア（myDist）を内製により開発した。myDist についてはその後も改良が重ねられ、平成 18 年には柿岡において、平成 22 年には女満別及び鹿屋においても、構内の複数の磁力計からなる観測網（人工擾乱監視システム）の整備とあわせて、人工擾乱監視と擾乱補正を業務化した。

2. 地震火山活動評価に関する調査研究

(1) 地磁気による地震の研究

地球電磁気学的手法による地震の研究は昭和 15 年頃から地磁気観測所においても行われている。方法としては地殻の応力変化に伴うピエゾ磁気効果によって生じる磁場変化、比抵抗変化に伴う地磁気変換関数の変化及び地電流の異常変化の検出などがある。

地震に関係する地電流の変化については昭和 13 年の塩屋崎沖地震や昭和 28 年の房総沖地震に関係した地電流変化が報告されており、これらはいずれも地震発生前後に柿岡で観測された地電流異常変化である。当時は地電流の異常変化を検知するため差電位差法による地電流観測が精力的に行われた。地震発生前後で地電流が異常変化する原因として、大地の応力変化に伴う流動電位が想定されていた。

地磁気変換関数の時間変化については、大正 12 年の関東大地震前後で柿岡における地磁気変換関数の経年変化のトレンドが変わったことが見いだされ、注目されるようになった。地磁気変換関数の時間変化は地震発生前後で上部マントルの比抵抗が変化することで説明できるとされた。これらの変化が地震発生前に発生しているとすると、地球電磁気学的手法により地震予知が行える可能性を示しており 1970 ～ 1980 年代にかけて地磁気変換関数の研究は地磁気観測所で精力的に行われた。

昭和 54 年に国の第 4 次地震予知計画に地球電磁気観測が盛り込まれ、これをきっかけとして当時切迫性が高いとされた東海地震を念頭において、科学技術振興調整費「フィリピン海プ

レート北端部の地震テクトニクスに関する研究」に参加し、御前崎と伊豆半島の松崎で地磁気及び地電流観測を開始した。観測データは本所柿岡までデータ伝送され、収集・解析が行われた。また、昭和 21 年の南海地震の前後で地磁気永年変化の異常がみられたことから、大学及び研究機関の協力のもと、プロトン磁力計を用いた全国的な全磁力永年変化の精密観測を開始した。これら観測データは地磁気観測所でとりまとめ、地震予知連絡会に報告するようになった。同じ頃、活断層の研究に地球電磁気的手法が取り入れられるようになり、地磁気観測所においても活断層周辺での比抵抗構造探査を盛んに実施した。これらは科学技術振興調整費のもとで行われ、「中部日本活構造地域の地震テクトニクスに関する研究」では、フォッサマグナ付近での地磁気・地電流観測から MT (Magneto-Telluric: 地磁気地電流) 法などを用いて地下の比抵抗構造の調査を行い、また「マグニチュード 7 級の内陸地震の予知に関する研究」では、相模湾北西部の神縄断層及び国府津 - 松田断層において人工電流源を用いた CSAMT (Controlled Source Audio-frequency Magneto Telluric) 法による比抵抗構造探査を行った。

1980 年代後半にはギリシャでの地電流を用いた地震予知法 (VAN 法) が脚光を浴び、国内においても大学を中心に地電流の研究観測が盛んに行われた。その頃、気象研究所において NTT の電話回線及び電極を用いた超長基線による地電流の観測手法が開発され、地磁気観測所においても気象研究所と共同で水戸市や沼津市周辺において研究観測を行った。また、平成 7 年の阪神・淡路大震災をきっかけとして VAN 法の検証を目的とした地磁気・地電流の研究観測が淡路島で実施された。特に地電流観測は NTT の電話回線を利用し基線長が十数 km に及び、淡路島の北部から中部地域を網羅するほどの大規模なものであった。しかしながら山陽本線や神戸市周辺を走る直流電車からの漏洩電流によるノイズが非常に大きく、地震活動に関連した地電流変化は検出できなかった。

地震予知とは地震の発生場所と時期、規模を的確に推定することであり、地球電磁気的手法に限らず他の手法でも容易なことではなく、研究が進展するにつれて逆にきわめて困難であることが明らかとなっていった。阪神・淡路大震災をきっかけとして国の地震予知計画が見直され、「地震予知のための新たな観測研究計画」の名称のもと再出発し、地球電磁気関係では大学を中心に地殻の比抵抗構造探査が活発に行われるようになった。しかしながら、当所においては淡路島での研究観測が終了した平成 13 年以降は地震予知を目指した調査研究は行っていない。

(2) 地磁気による火山の研究

地磁気による火山の研究は 1960 年代から地磁気観測所においても行われている。火山体内部でのマグマの上昇や熱水による昇温により、周囲の岩石の磁化が失われる (熱消磁) ことから、地表で磁場変化が発生する。このことは、地表で磁場変化を検出すれば火山体内部で発生している熱消磁の位置や規模を推定できることを意味し、火山活動の評価に貢献することが期待できる。

地磁気観測所での地磁気観測は、初期の頃は磁気儀を用いた偏角・伏角の観測が行われていたが、1970 年代に携帯型プロトン磁力計の導入により精密な全磁力観測が可能となったことから、その後は専らプロトン磁力計、又は同じく全磁力を測定するオーバーハウザー磁力計が

用いられるようになった。

昭和 49 年から始まった国の火山噴火予知計画に基づき、昭和 53 年に桜島、昭和 54 年に阿蘇山に全磁力連続観測装置が整備され当時の鹿屋出張所により観測を開始した。これらの観測は、桜島では火山灰の全磁力観測に及ぼす影響が大きく有意な全磁力変化の検出が困難であることから平成 11 年に観測を終了した。阿蘇山では噴火により火口付近での観測の維持が困難である等の理由から令和 4 年に観測を終了した。

昭和 61 年の伊豆大島噴火に際しては東京大学地震研究所による全磁力観測により噴火前から顕著な全磁力変化が観測されていたことが明らかとなり、地磁気による火山活動評価への期待が高まった。さらに、平成 2 年には当所による草津白根山での観測で火山活動の高まりに伴う顕著な熱消磁を示す全磁力変化が観測されたことから、玄武岩質に比べると磁化強度の弱い安山岩質の火山でも地磁気観測が有効であることが示された。同じ頃雲仙普賢岳で噴火が始まり、当所でも全磁力観測を実施しており、噴火に伴う熱消磁を示す全磁力変化が捉えられている。その後も、国内のいくつかの火山で熱消磁あるいは冷却に伴う帯磁を示唆する全磁力変化が観測され、火山活動の評価に地磁気観測が有効であるという認識が定着していき、気象庁の各火山監視・警報センターでも全磁力の繰り返し観測が実施されるようになった。また、草津白根山（白根山（湯釜付近））では噴火警戒レベルの判定に全磁力観測結果も用いられるようになった。

平成 26 年に御嶽山で噴火が発生し多数の犠牲者が出たことから、水蒸気噴火の予測技術向上に対する社会的要請が高まり、地磁気観測への期待が高まった。これを受けて気象庁では国内の火山（樽前山、吾妻山、安達太良山、御嶽山、九重山、霧島山（えびの高原（硫黄山）周辺））に全磁力連続観測装置を整備しており、地磁気観測所も地点選定などで協力している。

地磁気観測以外の電磁気観測としては、草津白根山や吾妻山、安達太良山での自然電位観測や、桜島における比抵抗変化の検出を目的とした ELF-MT 法（極超長波の電磁波を用いた MT 法）の繰り返し観測が実施されている。

現在、当所では雌阿蘇岳、草津白根山及び伊豆大島において全磁力観測を継続するとともに、火山性磁場変化の検出精度の更なる向上を目指した調査研究が行われている。火山での全磁力観測は火山活動により全磁力変化が発生する火口付近と、火山活動の影響を受けない山麓部で全磁力の観測を行い、両者の差をとることにより磁気嵐等の外部磁場変化や永年変化を除去し、火山起源の全磁力変化を検出する。しかし、観測地点ごとに偏角や伏角が少し異なるため、単純な全磁力差では外部磁場変化の影響が残ってしまう（DI 効果）。この DI 効果の補正が課題となっており、補正方法の確立に向けた調査研究が行われている。

3. 南極観測事業への協力

昭和 32 年、日本の南極地域観測が国際地球観測年 (IGY) の共同観測計画の一環として始まった。その 1 次隊から国土地理院は磁気図作成を目的として磁気測量を行っており、また、7 次隊は昭和基地での地磁気変化観測と絶対観測を開始していた。柿岡からは 10 次隊で初めて昭和基地への派遣があり、大気電気の研究観測を行った。18 次隊までに計 4 名が柿岡から派遣されたが、その目的はいずれも研究観測（大気電気・超高層）であり、国土地理院による地磁

気変化観測と絶対観測については手伝いを行う程度であった。

昭和 51 年、地磁気観測所長が南極観測審議委員会・宙空専門部会の専門委員に就任し、翌年出発の 19 次隊と以降の隊では地磁気観測所から職員が継続的に派遣されるようになった。19 次隊から 65 次隊までに越冬した派遣者 16 名は、国立極地研究所の超高層観測計画に加わる形で、宙空のモニタリング観測（空中電場観測・地磁気脈動観測・オーロラ光学観測など）を実施するとともに、地磁気定常観測（変化観測・絶対観測）の保守と更新に従事した。

令和 2 年、昭和基地を将来的に INTERMAGNET 認定観測所として登録申請するため、国立極地研究所の了解の下、観測設備の改修、観測とデータ集計の方法を独自に改良する方針を立てた。その準備計画の進捗管理と極地研究所との連携を担当する事務局として、令和 3 年設置の国際業務委員会の下に南極部会を設けた。また同年から、調査研究の重点課題として、INTERMAGNET 認定観測所の要件達成に要する技術開発を開始した。62 次隊の派遣では、全磁力連続観測のためのオーバーハウザー磁力計を昭和基地に新規設置した他、従来のゼロ磁場方式による絶対観測に加えて弱磁場方式を導入することで、絶対観測の実施頻度を従前の月 1 回から INTERMAGNET 推奨である週 1 回に高めた。

令和 4 年、南極観測審議委員会の下に設置されていた専門部会が廃止された。これに伴い、それまで宙空専門部会の専門委員であった地磁気観測所長は、南極観測アドバイザーボードの南極観測計画アドバイザーに就任することとなった。

4. 調査研究成果の所内刊行物

地磁気観測所の地球電磁気・地球電気観測の記録の成果物である地磁気観測所報告（年報）は、明治 30 年から平成 12 年まで印刷物として刊行された。年報には、地磁気、地電流及び空中電気の 1 時間値表等を掲載していた。平成 13 年から平成 24 年までは CD-ROM の形態で提供しており、磁気嵐リストや地磁気脈動のスペクトル解析図などの図表に加え、1 分値データや各観測所の観測状況に関する記事も収録するようになった。年報は、関係機関へ配布されたが、CD-ROM 版は（財）気象業務支援センターのデータ提供事業を通して入手可能である。平成 25 年以降、観測成果については過去の観測成果と共に web 公開することによりフリーアクセス可能とした。

昭和 13 年 3 月に、所員の研究成果をまとめた諸種の論文をまとめて報文として編纂し、当所初となる論文集である地磁気観測所要報が刊行された。この要報の刊行目的は、地磁気観測所における観測成果を年報として刊行する一方で、職員が研究した論文をも刊行することで年報とあわせて、日本の地磁気研究者に利用され学術の発展に寄与することであった。要報は、昭和 13 年から平成 12 年まで刊行された。

平成 15 年 3 月に、地磁気観測所テクニカルレポートは、要報の廃刊に伴い、国内外の地磁気観測事業の発展に寄与することを目的に、地磁気観測所において行われた技術開発、観測及び調査研究の成果を公表し、刊行することとなった。テクニカルレポートに掲載された論文が、年報ともども広く活用されて、関係機関における業務の発展の一助となることが期待された。一方、地磁気観測所レポートの前身である地磁気観測所要報をホームページにて公開するために、平成 24 年度調査研究委員会にて「地磁気観測所要報及び技術報告のデータベース化」

の実施計画が承認され、原稿がPDF ファイル化され翌年度までにデータベースが構築された。平成 24 年 8 月にホームページにて公開を開始し平成 26 年 3 月には検索ページを構築し、テクニカルレポートと同様に要報についても一般ユーザーが利用可能となった。これらにより、オープンサイエンス推進への貢献が図られた。