

日本の気象学の現状と展望

日本気象学会36-37期学術委員会および同委員会が依頼した執筆者グループ*

趣 旨

気象学・大気科学のフロンティアは、衛星観測や数値モデルなどの進展により、急速に拡大している。気象災害や環境問題に対する一般市民の関心は高く、気象・気候予測に対する社会からの期待も大きい。他方、1990年代には大学院重点化が始まり、2000年代には国立大学および研究機関が法人化され、教育研究制度が大きく変更された。2009年には、地球惑星科学連合が法人化され、地球科学の関連学会とその事業の再編が進んでいる。2013年、日本気象学会は公益社団法人となり、運営の透明性の確保と社会への貢献が強く求められるようになった。気象学と気象学会をめぐる環境は急速に変化している。学術委員会は、日本の気象学についての認識を共有しその一層の発展に資するため、最近の歩みを振り返り、今後の方向について展望することにした。最終章に、日本気象学会に対する8項目の提言をまとめる。

気象学・大気科学は、観測と理論を両輪として、専門的知見を蓄積してきた。第2次世界大戦後、コンピュータを利用した数値実験がこれに加わり、大気の動的な振る舞いに関する理解が急速に進んだ。衛星観測は、気象や気候に関するグローバルな情報を提供するようになった。コンピュータが高速化されるに従い、さまざまな分野の協力により複雑な気象・気候システムの数値モデルが開発されるようになった。データ同化手法の進展は、観測と数値モデルの垣根を低くし、精度の高い実況解析を可能にした。専門分化しながら深化してきた気象学も、知識の統合を志向するようになった。大気は地球のサブシステムであり、学際的な協力により、総合的な地球観の創出に向かっている。

気象学・大気科学は、天気予報や防災、気候・環境問題などを通じ、社会とのつながりが深い学問である。最近の観測・予報技術は進歩がめざましい。短期予報はメソスケール現象を一層きめ細かく表現し、中長期予報では予測の不確実性を考慮したアンサンブル予報が実用化された。予測精度のさらなる向上を目指し、現業機関と研究機関の連携も強化されている。また、予測情報の有効活用のため、情報提供者と利用者との連携も模索されている。

温暖化をはじめとする人為的な地球環境問題に対し、社会の関心はますます高まった。地球環境問題の解決には、大きな社会的・経済的負担を要する。最終的な政策決定は国民と為政者に委ねるとしても、気象学・大気科学は、判断の根拠となる正確な情報を国民に提供するという、大きな責務を負う。

国際的な連携も大きな課題である。アジアモンスーンや台風は、日本の気象の重要な研究課題であるが、観測、予測、社会貢献のあらゆる面で、アジア地域の国々

* (学術委員会委員長) 岩崎俊樹, 東北大学大学院理学研究科, iwasaki@wind.gp.tohoku.ac.jp
(委員および執筆者グループ) 石原正仁, 江守正多, 鬼頭昭雄, 隈 健一, 近藤裕昭, 近藤 豊, 斉藤和雄, 酒井重典, 笹野泰弘, 佐藤 薫, 佐藤正樹, 高谷康太郎, 竹見哲也, 田中 博, 藤吉康志, 三上正男, 余田成男
© 2014 日本気象学会

と協力していく必要がある。また、グローバルな気象・気候の監視では、効率的・効果的な観測システムの構築が喫緊の課題である。多額の費用を必要とする事業であり、世界の気象機関の連携が必要である。気象予測の結果は瞬時に世界中を駆け巡る。地球温暖化はもちろん世界的な関心事である。多くの気象・気候情報が世界中で共有される時代に入った。

科学研究の推進には有為な人材の育成が不可欠である。若手研究者の処遇問題が深刻化しており、改善に努力しなければならない。気象予報士の数は急速に増えている。協力して気象知識の普及に努力すべきである。福島原子力災害や地球温暖化問題では、情報提供の在り方が改めて問われた。正確な情報を、中立な立場で、国民に積極的に提供することによって、社会的責任を果たしていかなければならない。

2005年9月に、日本学術会議の報告書「第19期日本学術会議大気・水圏科学研究連絡委員会・気象学専門委員会の対外報告」がまとめられた。また、2010年4月には日本学術会議地球惑星科学委員会の報告「地球惑星科学分野の展望—地球の未来予測への挑戦—」の第2章にも、基礎科学としての地球惑星科学の現状と課題に関連して「大気海洋科学（気候システム科学）」がとりまとめられている。これら先行する報告も参考にされたい。

最後に、本稿はあくまでも執筆者グループの見解であることを指摘したい。もとより、日本の気象学の現状と展望は、学会員それぞれが自由に構想するものである。本稿がそのための一助となれば幸いである。

目 次

- | | |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| 1. 基礎科学として | 3.4 地球環境問題に関する社会とのコミュニケーション |
| 1.1 気象学における基礎と応用 | 3.5 原子力災害に備えて |
| 1.2 観測、理論、数値実験、データ解析、そして融合としてのデータ同化 | 4. 学術活動の展開と連携 |
| 1.3 マイクロ・メソスケールの気象学 | 4.1 学際科学としての研究推進 |
| 1.4 総観規模スケールとメソ α スケールの気象学 | 4.2 日本地球惑星科学連合 |
| 1.5 台風に関する気象学 | 4.3 国際協力と国際連携 |
| 1.6 大規模・グローバルスケールの気象学 | 4.4 大型研究の推進 |
| 1.7 地球システム科学の一要素としての気象学 | 4.5 衛星観測の推進 |
| 1.8 古気候学における気象学 | 4.6 航空機観測体制の構築 |
| 1.9 惑星科学における気象学 | 4.7 大規模数値シミュレーション |
| 2. 気象監視・予測と災害科学 | 4.8 気象・気候データ |
| 2.1 気象災害研究 | 5. 教育と人材育成 |
| 2.2 気象監視・予測のための観測システムの発展 | 5.1 はじめに |
| 2.3 気象予測システムの発展 | 5.2 初等・中等教育 |
| 2.4 黄砂および火山灰による災害と予測 | 5.3 大学・大学院教育 |
| 2.5 気象情報の提供と利活用の拡大 | 5.4 若手研究者就職問題 |
| 3. 環境の科学として | 5.5 男女共同参画 |
| 3.1 ローカルな環境問題（都市環境問題） | 5.6 社会とのコミュニケーション |
| 3.2 人為的排出ガスとグローバル大気環境問題研究 | 5.7 気象予報士会との連携 |
| 3.3 地球温暖化研究 | 6. 提言 |

1. 基礎科学として

1.1 気象学における基礎と応用

気象学は幅広い分野から構成される地球惑星科学の一学問領域であり、歴史的な発展や学問的な性格により次の4つに大別できる。大気のみならず多様な現象を認識し記載することから出発する形態学としての「大気現象学」あるいは「狭義の気象学」、大気の運動・放射・物質のみならず多様な素過程を記述し理解を図る応用物理学・応用化学としての「大気科学」、素過程の結合に興味をもち結合系の動態を調べるシステム科学としての「大気システム科学」あるいは「気候システム科学」、および、人間社会との関係を前提とし、災害や環境変化の予測・予知能力の向上を目指す自然災害科学・環境科学としての「応用気象学」の4つである。

大気現象学がアリストテレスの時代から脈々と続く現象の形態学であるのに対し、大気科学はニュートン以来の近代自然科学に基づく大気の科学である。歴史的な長短はあるものの気象学の両輪であり、国際測地学・地球物理学連合 (IUGG) の国際気象学・大気科学協会 (IAMAS) の名前が気象学 (Meteorology) と大気科学 (Atmospheric Sciences) を and でつなげているのが象徴的である。また、システム科学は、要素還元型科学の対極に位置づけられる比較的新しい (1950年代に生まれた) 学問であり、大気、気候、あるいは地球に関するシステム科学はコンピュータの飛躍的発展に伴って急成長している。これらは基本的に基礎科学的な色合いが濃い分野であり、大きさに言えば人間の知的興味に基づいた真理を探究する営みといえる。一方、応用気象学は、人間生活に役立ち社会に貢献する、出口を見据えた学問分野と捉えることができる。もっとも、基礎と応用は単純に二分できる訳ではなく、明瞭な学問分野の区分けができる訳でもない。常に領域や分野を跨ぐ学際融合的なところがあり、そこに新たな学問の課題が見つかることも少なくない。

この章では、基礎科学としての気象学について現状認識と将来展望を行う。現象記述の大気現象学と素過程理解の大気科学をひとまとめにする一方、対象の空間規模に応じて「マイクロ・メソスケールの気象学」、「総観規模スケールとメソ α スケールの気象学」、「台風に関する気象学」、「大規模・グローバルスケールの気象学」に分けて、それぞれの基礎科学としての気象学について述べる。システム科学関連では、まず、

「地球システム科学の一要素としての気象学」について述べ、時間を地質学的なスケールで遡る「古気候学における気象学」、および、惑星の構造や動態を明らかにし、それらの起源と進化を論じる「惑星科学における気象学」について述べる。また、研究手法の現状認識と将来展望については、次に一節を設けて各分野共通の視点で述べる。自然災害科学および環境科学としての応用気象学については、次の2つの章で述べる。

1.2 観測, 理論, 数値実験, データ解析, そして融合としてのデータ同化

気象学は大気を対象とした学問であり、その観測からすべてが始まる。現場観測、遠隔観測ともに、センサー技術およびデータ保管・通信技術の飛躍的発展により、新たな現象が発見されたり、既知の現象でも従来の認識を覆すような知見が得られたりする。例えば、1960年代に始まる気象衛星観測により大規模擾乱の全球的な分布や変動が把握できるようになったが、最近では、静止気象衛星のラピッドスキャン画像によって、メソスケール擾乱の変動状態を数分刻みで連続観測できるようになってきた。時間空間分解能の増強のみならず、観測できる対象も、雲やエアロゾル、大気微量成分、安定同位体比など、気象や気候の動態解析に重要なさまざまな物理量に及んでいる。また、GPS衛星を活用した大気中の温度や水蒸気の観測は、地上基地ネットワーク観測、低軌道衛星掩蔽観測とともに、1990年代に始まる実験的な段階からリアルタイムで現業の数値天気予報等に活用できる段階になってきた。レーダーやライダーなど地上および飛行体搭載のリモートセンシング測器、大気微量成分の分析装置なども、エレクトロニクス技術の進歩により、これまでにないような精度、分解能での観測が可能になっている。また、データロガーの小型大容量化や携帯基地局を利用したデータ転送も、現場観測の有様を大きく変えつつある。このような観測データの飛躍的な量的増大と質的充実が基礎科学としての気象学を変革させている。今後とも、新しい観測手法を開発し、観測網の充実を図るとともに、現象の理解につながるような横断的な観測の実施なども検討していく必要がある。

従来、理論とは、現実大気の状態を理想化抽象化して問題をたて、紙と鉛筆だけを頼りに数理解物理学的諸手法でこれを解き、おもに現象の理解を図るものであった。基礎物理学の分野では、理論による予言と実験による検証という基本的枠組みがはっきりとしてい

るが、地球や宇宙、生命など具体物を学問対象とする分野では、理論の予言的な役割よりも、現象の理解という目的のほうが大きい。もっとも、近年は線型解析、弱非線型解析だけで完結するような理論的課題が減り、非線型問題をコンピュータで解く数値実験との境界があいまいになりつつある。

基礎科学としての気象学の実験は、現実大気の状態を理想化抽象化して、室内またはコンピュータで実験を行うことにより、現象の理解を深めるものである。基本的に物理学分野の実験と同様の論理展開をするが、複雑精緻な巨大数値モデルを用いるコンピュータシミュレーションでは、1回のシミュレーションだけで現象を詳細に気象学的に記述する場合もある。逆に、理想化簡略化したメカニスティックモデルを用いた数値実験では、パラメータスウィープの感度調査により定性的な概念・認識の新たな提案を行うことが多い。大気現象の総合的な理解を得るには、このような低自由度のメカニスティックモデルから高分解能の複雑モデルまでの階層的なモデル群を組み合わせる研究を進めることが有効である。1940年代のENIAC以降、計算速度や記憶容量などコンピュータ性能の飛躍的向上は続いており、ある時までには困難であった問題が工夫次第で解けたりすることもあるので、コンピュータを如何にうまく使うかが研究者の腕の見せ所であったりする。そのとき、地球シミュレータや京速計算機など世界一のマシンで誰にもできないような計算をしてみせることも一つの方向であるが、皆が使えるようなマシンでも誰も思いつかなかったような実験を初めてやってみせるというやり方もある。また、オックスフォード大学の若手研究者が始めた climate-prediction.net のように、世界のボランティアのパソコンを大動員した巨大アンサンブル実験などの面白い発想の取り組みもある。

基礎科学として数値モデルを如何に用いるかは重要な視点である。また、多様な時空間スケールや物理過程にわたる大気の数値モデル化は、未だ多くの重要な研究開発課題を抱えている。例えば、低解像度の数値モデルには計算時間短縮のため静力学平衡を仮定した基礎方程式が用いられることが一般的だ。しかし、この仮定は水平スケールの小さな現象に関しては成り立たない。このため、近年では、静力学平衡を仮定しない非静力学の数値モデルが精力的に開発されている。一般に、大気の数値モデルでは、放射、雲と降水、大気乱流などの微物理過程は経験則に基づくパラメータ

化（パラメタリゼーション）により表現されている。パラメタリゼーションは数値モデルの性能を大きく左右するので、その精密化が課題となっているが、それは数値モデリング特有の技術的問題というよりは、異なったスケール間の相互作用の表現という気象学にとって極めて基本的な問題の一つといえる。また、大気は、海洋、陸面水文過程、生態系（動的植生）、大気組成（化学反応過程）、超高層電離大気などと相互作用する。これらの系や過程に関しても数値モデル化が進み、大気の数値モデルと結合され、さまざまな研究と業務に利用され始めたが、まだまだ発展途上の段階にある。

データ解析は、観測データや数値実験データを整理し解析することにより、現象の記述を行うものである。新たな観測や数値実験では、その新奇性のアピールが第一であり、速報性が要求されることもある。一方、再解析データのように誰でも入手できるデータでも、問題意識と着眼点、解析の工夫次第で新たな現象や事実を発掘できる可能性がある。しかし、どちらのデータも莫大な量となっており、研究コミュニティとしてのデータベースの構築やデータ可視化を含む解析ツールの整備など、情報科学基盤の整備がますます重要な時代となっている。また、データの流通を促進するうえで Network Common Data Form (NetCDF) などに代表されるデータフォーマットの標準化も大切である。解析手法については、統計解析や力学解析のさまざまな手法があるが、それらを駆使するとともに新たな手法を開発するなど新知見を得るための努力が必要である。素材となるデータと目的にあった道具を選び、上手に使う解析し、新たな発見や理解に至るのも研究者の腕の見せ所といえよう。

観測と数値モデルの融合手法としてデータ同化がある。一般に、気象観測を広範囲にわたって時間的空間的に均質に行うことは極めて難しい。これに対して、現実大気の数値予報モデルは、気象要素の時空間変動を地球規模でも均質に予測するものであり、そのようなモデルで記述する物理法則を拘束条件として、観測のない時刻・場所での物理量をよりもっともらしく推定する手法がデータ同化である。簡便なナッジングから4次元変分法やカルマンフィルターを用いた逐次データ同化法まで、さまざまな手法が開発され使われている。先端的なデータ同化手法は、高精度の観測データ、高性能の予報モデル、および豊富な計算機資源を必要とする手法であり、近年これらの条件が整っ

てきたことで、その研究開発・実用化が急速に進展している。時間的・空間的に均質で一貫性のある最適推定データは、初期値誤差を抑えて予報精度をあげるのみならず、再解析データとして大気より正確な状況を認識するためにも大変役立っている。

1.3 マイクロ・メソスケールの気象学

マイクロ・メソスケールの気象学の大きな課題は、スケール間相互作用と物理量（風、雨、雪）の極端な集中メカニズムの解明である。前者はマイクロスケールから総観規模・地球規模へと連なる大気現象の科学的理解の深化が求められており、後者は災害の発現に関わるため、防災システムの構築などの社会貢献が期待される。高分解能でかつ詳細な雲微物理過程を組み込んだメソモデル、静止および極軌道衛星、ドップラー・マルチパラメータレーダーやウィンドプロファイラー網、雷監視システムなどが導入され、メソ現象の理解が飛躍的に進展し、災害軽減にも大きく貢献した。しかし、突発的に発生する大雨は、発生環境場のわずかな初期値の差で結果が変わるというカオス的な性質を示す場合があり、予測は依然として困難である。豪雨・豪雪災害の最大原因は雲域の停滞であり、収束場の維持と雲の停滞メカニズムを明らかにするためには、雲内の上昇・下降流や降水粒子の形成・落下過程の観測とともに、大気下層の水蒸気場の解析精度向上が必要である。さらに、竜巻や台風の活動の鍵となる積乱雲が発生するメソ環境場、特に、強い上昇流を発生させる要因となる地表付近の収束線の形成過程と検出および強風下での大気境界層の組織的構造について、さらなる観測的・理論的研究の進展が望まれる。

マイクロスケールの気象学における主要な課題は、大気境界層での乱流構造の解明である。従来の境界層研究においては、一様かつ平坦な地表面上で形成される境界層を対象とし、接地境界層の相似則の導出と大気陸面相互作用過程の把握を目的としてきた。地表面の起伏や粗度は微小な規模とみなすことで基本理論が構築されてきたが、実際の境界層では地形の複雑な起伏や高層建築などの構造物の影響を受け、その平均構造が変容し非定常性が強くなる。近年、複雑地表面での境界層の研究が発展し、そこでの運動量・水・熱の輸送過程の理解のための観測や微細格子の数値モデルによる研究が主流となりつつある。また、海上では、強風時に碎波やそれに伴う飛沫の発生により運動量や水蒸気の輸送が陸面の場合とは異なる挙動を示すこと

が、実験や観測から確認されている。強風時の大気境界層における大気海洋相互作用は台風の強度に大きく影響を及ぼすため、この問題の研究がますます重要になる。

近年、風観測のために3次元走査型ドップラーライダーが開発され、LES (Large Eddy Simulation) によるシミュレーションと比較可能な大気境界層の立体構造も観測されるようになった。大気の鉛直多層構造、組織的乱流構造の可視化、ダストデビルや漏斗状雲で可視化される前の段階の竜巻の検出も可能である。水蒸気や温度、オゾン観測のためのライダーも開発され、携帯電話などと競合するマイクロ波長域の観測装置に代わって、さまざまな波長帯を用いたレーザーセンシングの重要性が今後増加するであろう。さらに、リモートセンシング技術が進歩するほど、リトリバルされた各種物理量を検証するためのエアロゾルから雲粒、そして降水粒子までのシームレスな in situ 観測データの重要性が増大するため、大気中で少量かつ短時間で測定可能な観測手法の開発が強く望まれる。

水相を含んだ雲物理過程の知識の深化とそのモデル化は、豪雨の降水形成過程の解明ばかりではなく、雲の帯電機構や上層雲の放射効果を見積もる上でも重要である。降雨・降雪粒子の地上観測では、光学式センサーや画像処理技術の進展により自動化が進み、信頼できる大量のデータがさまざまな気象条件の下でも長期にわたって取得できるようになった。ドップラーレーダーはもとより、偏波（マルチパラメータ）レーダーも全国に数多く展開され、雲内の降水粒子判別にも利用されている。さらに、わが国も含めて、国際的にクラウドチャンバー実験が盛んに行われるようになってきた。しかし、肝心の雲内観測が乏しいため、自然の雲内での氷晶核あるいは2次氷晶からの氷晶発生過程、固体降水粒子の成長過程やそれらの融解過程についてはほとんど進展が見られない。航空機を用いた雲内のリモートセンサーと直接観測は、地上および衛星を用いた広範囲な降雨や降雪強度の測定と合わせ、降水過程の解明に必要である。

数値モデルの多要素化、他分野（海洋、水文、雪水、生態、都市、人文）との共同研究が進み、検証のために測定項目の多様化が求められている。エアロゾルの直接効果や間接効果を議論するためには、多くの波長域を用いたアクティブ・パッシブセンサーを搭載した衛星や大気質の化学成分の直接測定が必要不可欠

である。また、大型 VHF レーダーやドップラーレーダーは、雲物理学と雲・降水物理学という学問的観点のみだけではなく、研究者同士を結びつける画期的役割を果たした。同時に、ドップラーライダーを用いれば、さらに、エアロゾルから雲の発生までをシームレスに研究することが可能となり、大気化学と大気物理学の研究者間の連携が進みつつある。従来よりも広範囲の風と大気質を観ることにより、森林や都市、乾燥域、山岳域、極域寒冷圏などにおける水・物質の輸送と循環研究、さらには生態学、風工学、自然エネルギーなどの関連分野との連携が期待される。

メソ降水現象の新たな観測の方向性としては、現在すでに活用されている民間航空機や船舶による測定データなど、移動体と既存の通信網を積極的に活用した気象観測データの収集・利用がある。大陸横断鉄道などを利用すれば広範囲で長期的な気候研究にも有効な観測データが得られるであろう。そのためには、多少精度は低くても軽量で簡便な測定装置の開発、データマネジメント（複数データのグリッド化による質の向上と同時に個人情報保証など）に積極的に取り組む必要がある。

最後に、地域密着滞在型の観測の重要性を指摘したい。地域に密着した観測は一般市民にも理解しやすく、教育効果・普及効果も大きい。地域特有のマイクロ・メソ現象を解明し、その研究成果を防災に役立てるためには、気象学会の支部単位程度にまとまった、観測研究の協力体制が必要である。

1.4 総観規模スケールとメソ α スケールの気象学

温帯低気圧、メソ α スケールの擾乱、台風は、東アジアの天気図でよく目にする一般になじみの深い現象である。これらの現象は前節で取り上げた現象より水平スケールが大きく、数値予報の予測対象として十分扱える。現象の理解、観測システムの進展、数値モデルとデータ同化技術の進歩に伴い、着実に予測精度が向上してきた。なお、本節では総観規模スケールとメソ α スケールの現象を扱い、台風はやや特殊な研究戦略を必要とするので次節で扱う。

温帯低気圧の発達に関する理論は1950年前後に傾圧不安定論として確立した。初期の傾圧不安定論は水平一様な温度風シアを基本場とし、準地衡風近似を満足する、いわば「特殊な」擾乱を扱っていた。その後の研究では、より現実的な条件下で不安定条件（発達条件）が調べられるようになった。

温帯低気圧の特徴の一つは前線を伴うことである。

前線の形成については、地衡風平衡を仮定する傾圧不安定論を直接適用することはできない。前線論は1920年代ビャークネスの観測に基づく描像を基本として発展してきた。1990年代に、閉塞前線については寒冷前線が温暖前線に追いついてできるという古典論が見直され、ラグランジュ的な見方に基づき後屈型温暖前線と見なすべきという考え方が提唱された。前線は局地的な激しい現象と深く関係しており、さらに研究を進める必要がある。

北半球では、温帯低気圧は北西太平洋と北西大西洋でよく発達し、ストームトラックと呼ばれる。その形成や強化に関して、グローバルな大気の超長波による基本場の変形、大気海洋相互作用による基本場の変質、海陸分布に伴う地表面摩擦の地理的な分布の影響などが議論されている。また、温帯低気圧自身の波束が下流に伝搬し高・低気圧の発達を促すことが理解され、それを表現するために波動の活動度フラックスが提唱された。近年、防災上の関心もあり、温帯低気圧の急発達の研究が盛んになってきた。社会の関心も高く爆弾低気圧という言葉も使われている。温帯低気圧の発生発達は数値モデルでよく再現されるようになり、短期予報精度の向上につながっている。中期予報（週間予報）においては、傾圧不安定に伴う誤差成長が予測の不確実性・信頼性と深く関係していることが認識され、接線形不安定論がアンサンブル予報に対する一つの重要な理論的根拠とされている。地球温暖化に伴って、温帯低気圧活動が将来どのように変化するかという問題にも、関心が集まっている。

日本の気象災害において、集中豪雨は、その人的・経済的な損害の大きさから、最重要のものの一つといえる。衛星観測の充実や数値予報技術の進展により、台風の接近時にもたらされる地形性の豪雨については、近年はある程度精度の良い予測が可能になってきたが、梅雨末期などにしばしば発生する集中豪雨は、現在でも予測が大変難しい現象である。総観規模の収束や傾圧性・地形など力学的な要素と、湿潤大気の安定度など熱力学的な要素が複雑に絡み合って発生する。明瞭な前線に伴わずに発生する場合もある。集中豪雨の理解は、メソ数値予報モデルの発展とともに進展しており、特に下層の相当温位を左右する水蒸気量の重要性が指摘されている。衛星マイクロ波放射計データや GPS 可降水量の現業メソ数値予報での利用開始により、水蒸気量を推定する手段は以前よりも増えたが、水蒸気量の鉛直プロファイルや水平分布を精

度よく決定する手段は陸上でもまだ不十分であり、海上の観測はきわめて限られているのが現状である。リモートセンシングをはじめとするさまざまな観測から下層水蒸気量を推定するための新たな技術や、数値モデルやデータ同化技術の進展が望まれる。これらの技術の進展は、前節で述べられているメソ β スケール以下の顕著現象の理解や予測のためにも不可欠である。集中豪雨についての実用的な防災リスクマネジメントのためには、メソアンサンプル予報による予報誤差や信頼度に関する定量的な予測情報が求められる。

台風や熱帯低気圧が南方に離れて位置しているときに、日本など中緯度の陸上で大雨が降ることがあり、プレ (PRE=Predecessor Rain Event) として、近年注目されるようになった。ジェット気流と下層のフロントジェネシス、周辺の水蒸気に関係する中規模現象として説明されるようになってきているが、日本の大雨との関連に関してさらに研究を進める必要がある。

梅雨前線は、大きく見るとアジアモンスーンの一部であり、東アジアの降雨系の季節進行の一部として理解する必要がある。近年、梅雨前線の成因をめぐる議論にいくつかの発展が見られる。

冬季の寒気吹き出しに伴う日本海沿岸や山岳部での豪雪は、古くからこの地方に大きな影響を与えてきた。近年のメソ数値予報で、これらの豪雪の予測がある程度可能となったが、太平洋側平野部の積雪の予測は大変難しい。首都圏をはじめ太平洋側の地方での積雪に対する都市機能は脆弱であり、降雪・積雪の予測精度の向上が望まれる。数値予報モデルの初期値の改善や降水過程・放射過程・境界層過程・陸面過程の高度化が必要である。

1.5 台風に関する気象学

台風は、数百～数千 km 程度の水平スケールを持ち、メソ α スケールの現象として分類される。熱帯一亜熱帯で発生する大気現象としてのユニークな特性をもち、かつ甚大な被害を及ぼすことから、継続的に科学的な関心が持たれるとともに、社会的にも重要な課題として研究されている。

台風にはさまざまな研究課題があるが、とりわけ、減災・防災上の要請から、台風予測の精度向上が大きな目標である。精度良い台風観測、データ同化技術開発、数値計算の精度向上などの研究が進められている。近年、特に数値シミュレーションについて、解像度、数値スキーム、物理過程等から改良が進められ、

非常に精緻な台風シミュレーションが行われるようになってきている。しかし、台風の強度変化や発生などの再現は現状でも難しく、今後の進展が待たれる。科学的知見としての台風の発生・発達・構造・経路等のメカニズムをより深く理解するための研究は従来から継続的に進められているが、このような理論的理解の深化が予測精度の向上に必須である。台風の観測については、静止気象衛星観測によってルーチン的な監視が行われているが、航空機による台風の直接観測は、現在では大西洋域のハリケーンのみでしか実施していない。特別観測を除けば、北西太平洋域を含めたその他の海域で飛行機観測を行うのは難しい。今後諸外国との連携を深めて、航空機観測について、わが国の取り組みを強化する必要がある。観測が稠密な地域に上陸・接近した台風については、レーダーやゾンデなどの豊富なデータが取得できるが、熱帯における台風発生地点付近では観測データが乏しい。このことが、台風の発生メカニズムに関する研究の進展を阻害しており、観測とモデリングの連携による今後のいっそうの進展が要請される。

近年、将来予想される気候変化に伴って台風の数や強度がどのように変化するかという問題に大きな関心が集まっている。この問題にアプローチするために、過去の解析データを利用した台風の気候学的な研究が盛んになってきている。例えば、産業革命以後の近年100年程度のスパンで台風の性質がどのように変化してきたかについて調べるために、過去の観測データを掘り起こし、新たに解析する試みが進められている。多くの気候モデルによる予測では、地球温暖化に伴って台風の数は減るが強度は増す傾向が指摘されている。このような予測結果の信頼性は、観測されている台風のさまざまな性質がどれだけ気候モデルで再現できるかが一つの尺度となる。この中には、過去の観測データに示される台風の変化傾向や、観測されている台風の発生場所や経路の地理的特徴、台風の構造、強度の頻度分布が含まれる。また、台風の性質（構造・発生・発達・進路等）に関する理論的な理解も温暖化に伴う変化を説明するには不十分であり、さらに深める必要がある。

台風研究に関して今後を展望すると、数値シミュレーションをさらに精緻化させるために、強度変化の再現性、物理過程依存性等の未解決な問題の進展を図る必要があるだろう。数値天気予報の改善には初期値データの同化手法の進展が必要である。従来の日本域

の稠密な観測体制の維持発展に加え、観測が希薄な地域の観測体制の強化、衛星リモートセンシングの利用、航空機観測体制の整備など多くの課題がある。同じく重要な課題として台風理論の深化があり、豊富なシミュレーション結果や観測データに基づいた理論の発展が待たれる。

1.6 大規模・グローバルスケールの気象学

大規模・グローバルスケールの大気現象について、説明可能な部分については概ね理論的な理解が進んでおり、これまでの10~20年の間に新たな理論を構築できるようなケースは稀であった。一方で、精緻化する観測データや数値モデルの結果を解釈するためには、大気力学的な視点が必要であり、大気現象の力学的なメカニズムを理解するために大気力学の概念が必要とされている。

大規模・グローバルスケールの気象学のうち、伝統的な乾燥大気力学について、循環の力学、熱力学過程、波動、渦運動、不安定、乱流等、ナビエ Stokes の基礎方程式によって記述が可能であり、ほとんど理論的な理解が確立している。もちろん、例えば乱流の一般理論の構築等、進展が難しい領域があり、視点によっては今後の発展の可能性もあり得るだろう。乾燥大気現象のうち、ブロッキングや現象のカオス的なふるまいについて、予測可能性のある視点からの研究が進められている。

一方、雲降水システムが大規模循環に及ぼす役割については、湿潤循環を記述するための理論的な理解が途上であり、発展の余地がある。特に、熱帯大規模循環は湿潤過程に支配されており、雲降水システムの組織化や変動について、wave-CISK や WISHE (wind-induced surface heat exchange), WTG (weak temperature gradient approximation) 等、単純化した理論の構築の試みが継続的に進められている。雲降水システムは、水蒸気が凝結する際に放出される潜熱を駆動源とする特徴があるが、一方で、降水の蒸発による寒気流の形成などメソ循環もその大規模構造に大きな影響を果たしている。雲と放射との相互作用も循環の維持・形成に重要であり、関与するプロセスが複雑なため理論の妥当性について常に検討が迫られている。

大気の全球的な循環に関して、伝統的な子午面3セルの大気大循環的描像について、1980年代以降にハドレー循環の理論的な再検討が行われ、理解が進んだ。大気大循環の記述方法について、1980年代以降、

オイラー循環とラグランジュ循環の視点が提示され、それぞれの利点が指摘されている。特に、物質循環や波と波動の相互作用の観点からラグランジュ的な記述方法が有効性を発揮してきた。ラグランジュ循環は、実用的には変形オイラー平均の手法が解析しやすく、また、温位座標系にそった平均やそのバリエーション(z ↑系)などが、大気大循環の一側面を表現する手段として使われている。大気大循環を記述するための方程式系では、例えば3次元的な波動の伝播と平均流との相互作用の記述といった診断的手法において、研究上の発展が最近いくつかあり、理論的検討の余地があることを示している。

熱帯のハドレー循環、ウォーカー循環、モンスーン循環といった大規模循環は湿潤プロセスに支配されるとともに、大気-海陸相互作用が重要な役割を果たしている。熱帯の大規模循環に関して、季節内変動・年々変動との関係や、雲降水系のマルチスケール相互作用など数多くの研究がなされている。モンスーン研究では、研究上の視点の多さが焦点の拡散を招くためか、最近までその研究に停滞感があつた。近年、モンスーン循環が気候モデルにおいてよく再現できるようになってきており、数値的な予測、気候変動に伴う変化、それらを使ったメカニズム解析など、今後の進展が期待できるようになってきた。

大気現象的視点に立つと、客観解析データや数値シミュレーションの精緻化により、観測が未整備な領域を除いて大規模現象の多くはデータの中に捉えられている。観測を含む純粋な意味での現象の発見的な研究は少なくなっているが、多様なデータの解析により、今まで知られていなかった現象の特性、その理解にむけた試みは現在でも継続している。特に、中層大気・超高層大気については、重力波等、新たな観測による現象の発見と数値シミュレーションの発展が相補的に進められている状況にある。また、グローバル・大規模スケールの現象とより小規模スケール(メソスケール等)の現象とのマルチスケール間の相互作用については、研究途上である。

大気現象の理解のための数値モデルの利用が近年特に目覚ましい。数値モデルで再現される現象については、収支解析や感度実験等により、メカニズムにある程度迫ることができる。大気大循環モデルにより概ね大気大循環や総観規模の現象の再現が可能になっているが、熱帯の大規模循環等の再現性はまだまだ不十分である。例えば、熱帯の季節内変動・MJO (Madden

Julian Oscillation) について、最近まで大気大循環モデルによる再現性は不十分であったが、近年は積雲パラメタリゼーションの改善や高解像度の全球非静力学モデルにより、再現性の向上が著しい。また、気候場の再現性について、例えば降水の地理的分布について、気候モデルの共通のバイアスとして関心事となっている (double ITCZ 等)。

将来予想される地球温暖化に伴う気候変化は、気候モデルによる予測結果が提示されており、将来の大気大循環がどのような変化をするかについて関心が高まっている。気候変化に伴う大循環の変化について、観測的な検証と大気力学・大循環理論による解釈が必要である。例えば、熱帯の大規模循環は温暖化に伴い弱化する予測結果が出ているが、これに対する解釈は近年のハドレー循環理論・熱帯力学の進展に負うところが大きい。

今後の展望として、新しい観測データの情報を取り込んだ (同化した) 高解像度の数値モデルの精緻化により、ますます数値モデルの再現性の向上と、それを利用した現象の理解が進められるであろう。一方、将来気候や古気候、惑星気象など、観測されていないあるいは観測が不十分な現象を説明・理解するためには、数値モデルの発展だけではなく、理論的理解の進展が求められる。大気力学や大循環理論は、このような未知な現象について説明能力の向上が必要であろう。

1.7 地球システム科学の一部要素としての気象学

気候システムあるいは地球システムの一部としての大気を考えると、海洋や陸面などの他の部分系との結合過程の理解と外力に対する応答が重要である。結合過程としては、大気-海洋、大気-陸面、大気-雪氷、大気-生物圏、大気-電離圏、大気-微量成分 (化学組成)、大気-高エネルギー粒子など多岐にわたる。これらを統合的にモデル化した地球システムモデルの開発が進められており、知識の統合のプラットフォームとしての役割を果たすようになっている。地球システムのうち、大気-海洋-陸面の結合過程から構成される系を気候システムと呼ぶことが多い。システムに内在的に含まれない要素の攪乱を外力とみなしたとき、システム全体が外力に対してどのように応答するかという視点がシステム論として重要である。外力は、人為起源温室効果ガスの変化や太陽活動の変化等の自然・人為の境界条件・外部パラメータの形で与えられる。例えば、二酸化炭素濃度を外的な変数と考

えられるシステムにおいて、二酸化炭素濃度が倍増した条件での全球平均地表面温度の応答を気候感度と呼び、地球温暖化を論じる際の指標となっている。

大気は、対流圏、中層大気、超高層といった部分系から構成されるため、これらの部分系間の (多圏間の) 相互作用の観点からの研究が進められることが多い。天気現象が支配的な対流圏と成層圏 (あるいはより高層) は、それぞれ独立した分野としての研究と、対流圏・成層圏の相互作用としての観点到立つ研究が進められている。成層圏の準2年振動、突然昇温、オゾンホール等における対流圏からの重力波やロスビー波等の擾乱の役割の重要性は従来から認識されており、観測的・数値モデル的にもこのメカニズムは精緻化されつつある。また、成層圏の擾乱や太陽活動等の変動による超高層循環の変化が、対流圏に及ぼす影響についても、研究が進められている。オゾンなど化学輸送過程について、成層圏と対流圏を統一的に扱う試みも進展している。

季節スケールより長期の気候問題を議論する際には、大気・海洋相互作用の理解が欠かせない。エルニーニョや季節予報、数十年変動、さらに長期の気候変動予測には、大気海洋相互作用の理解と、大気海洋結合モデルによる予測研究が必要である。気候変動予測のために、大気海洋結合モデルの気候場の再現性の向上に大きな努力が払われており、大気循環から海洋深層循環までを含めた議論が必要である。また、より短期の総観規模の現象、台風の強度変化や黒潮上の温帯低気圧の変質についても、大気海洋相互作用の重要性が認識されるようになってきた。例えば、台風のより現実的な再現のためには、海洋の表層付近の湧昇や乱流混合による海面水温の低下、大気海洋間の運動量・熱などのフラックス変化などの効果を考慮する必要がある。

大気のもう一つの下部境界条件である陸面との相互作用についても、特に水循環の観点から研究が重要である。気象現象の理解には、陸域の降水、河川・地下水による流出、土壌水分の変動、陸面からの再蒸発等のプロセスを正しく理解することが必要である。同時に、水循環の理解には、降水の性質を決めるメソからモンスーンまで多様なスケールの気象現象の理解が必須である。寒冷域の雪氷・氷床や凍土などの性質は、アルベドを通じたエネルギー収支への影響など、気候を支配する重要な要因である。また、陸域生態系 (植生) についても、蒸発散やエネルギー収支、炭素循環

等によって大気に影響を及ぼしており、大気・生態系相互作用を考慮することが地球システムの理解に欠かせない。数値モデルにおいても、陸面モデル・陸域生態系モデルの精緻化は、気候場の再現性の向上のために重要である。

大気の組成変動について、エアロゾル、化学物質は、大気の流れに受動的に流される物質と、よりアクティブに大気に作用する物質とがある。特に、エアロゾルは後者の観点から地球システムの重要なコンポーネントになっている。エアロゾルによる放射への直接効果ならびに雲生成を通じての間接効果は気候変化の重要な要因である。化学物質の変動、対流圏・成層圏のオゾン変動に直接関係し、オゾンホールや成層圏循環に影響を与える。また、炭素循環や人為起源温室効果物質は、温室効果を通じて長期的な気候変動を引き起こしていると考えられている。

1.8 古気候学における気象学

古気候学とは過去の気候とその変動の原因を研究する学際的な学問である。「過去」とは、気象測器による観測が本格的に始まった19世紀半ば以前の時代を指す。「変動の原因」としては、地球軌道要素の変調と大気-氷床-地殻の変化、温室効果ガス、太陽活動、火山噴火など、気候システムで外力とされる要因が挙げられる。従来は、地質学、地球化学、古生物学、地理学、第四紀学、古海洋学、雪氷学、木材学、歴史学、考古学、花粉学等々の古気候・古環境復元に関する学問分野が中心であったが、近年では気象学、気候学、海洋学、生態学等との交流が進み、グローバル～ローカールスケールの気候・環境変動の総合的な理解とそのメカニズムの解明を担っている。その意味で気候システムを理解する学問としての古気候学の意義が深まってきている。

また、「古」気候とはいえ、近過去～現在の気候・環境変動やその将来予測研究との関係が深くなってきた。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第1作業部会評価報告書では、第4次評価報告書 (2007年) に「古気候」の章が独立し、第5次評価報告書 (2013年) でも「古気候アーカイブからの情報」の章がある。後者では、初期の測器・文献および自然の気候アーカイブの特性、放射強制力と気候応答の再構築、地域規模の変動性と極端現象の再構築、急激な気候変動とその地域規模の発現、海面水位と氷床のパターン・振幅および変化率、気候システムの不可逆性に関する古気候的な見通し、古気候データとモデル間

の相互比較が取り上げられる。

気象学に近いところでは、気候モデル相互比較実験による過去の気候再現実験と古気候データの比較により将来の気候変化の不確実性を低減する試みがなされている。2008年に開始された第5期結合モデル相互比較実験 (CMIP5) では、モデル評価・気候予測・理解を目的とする多くの実験が設定された。また古気候モデリング相互比較実験 (PMIP) は、同一境界条件 (ただし現在とは大きく異なる境界条件) で感度実験を行い、モデル間の相互比較および地質データ解析等との比較を行うことで、気候変動メカニズムの理解と古気候再現の精度向上を目指している。他の時期と比べて古気候データが豊富に収集されている21,000年前の最終氷期最盛期と6,000年前の完新世中期および過去千年紀を対象とした実験は、CMIP5実験としても位置づけられる。地域的な降水量変化、海水変化、エルニーニョ南方振動 (ENSO) 変動度の変化に関する古気候記録をもとに、将来予測実験に使われている気候モデルの評価が行われている。

気象学と他分野との相互交流の舞台として、古気候学の進展が期待される。特にアジアにおける過去2,000年の古気候代替データの整備が進んでおり (最近では同位体を使った研究も行われている)、地球システムモデルを用いた再現実験との比較検討が重要である。代替データから気候を再構成するにも気象学・気候学の知識が欠かせない。古気候学を媒介として、気象学から異分野と積極的に交流する気構えが必要である。

1.9 惑星科学における気象学

惑星科学とは、太陽系の惑星や近年続々発見されている系外惑星も含めて、惑星やそれらの衛星について研究する基礎科学で、地球科学と天文学・宇宙科学をつなぐ総合科学である。各惑星の構造や動態の普遍性と特殊性を明らかにし、それらの起源と進化を論じることが中心的課題となっている。惑星としての地球も含めて個別の惑星を相互に比較することで、各惑星のみならず地球そのものに対する認識の深化がもたらされる。そのような惑星科学の中でも惑星気象学・気候学がわれわれの興味と重なる分野である。

惑星大気観測についても、センサー技術や通信技術の飛躍的発展と相まって大きな進展がある。2010年5月に打ち上げられたわが国の金星探査機「あかつき」は、金星周回軌道に入ることができず新たな観測計画が検討中であるが、搭載された5つのカメラで雲層の

上から下までの大気の運動を動画として描き出し、金星大気四日循環の謎を解き明かそうとする世界初の惑星気象衛星である。また、地上および地球周回軌道衛星に搭載された望遠鏡による惑星大気観測も進んでいる。名寄市にある北海道大学ピリカ望遠鏡は、世界最大級の惑星観測優先望遠鏡であり、惑星探査機と連携した国際共同観測が期待されている。わが国の将来計画としては、火星探査計画 MELOS や惑星観測専用宇宙望遠鏡計画などがあり、大気観測の提案がなされているが、このような探査衛星観測の推進が学術振興の駆動力となるので、着実に実現されていくことが望まれる。

金星の四日循環、火星の砂嵐、木星の帯状縞構造や大赤斑など、それぞれの惑星に固有の大気現象・大循環形態があり、それらの形成・維持メカニズムの理解には、惑星大気モデルを用いた数値シミュレーションや実験が重要である。基本的には、地球の大気大循環モデルや気候モデルをベースにするとしても、それぞれの惑星パラメータや大気組成に合わせたモデル構築が必要である。地球の場合には、数値天気予報モデルの開発という現実的な要請により、圧倒的な量の観測に基づき十分に検証されたパラメタリゼーションやチューニング（モデル分解能以下の現象の効果を、物理法則を簡略化した経験則としてモデルに組み込むこと）ができたが、惑星大気モデルを開発する場合には、同じような作業過程を経ることなく安直な移植を行うことは原理的に許されないのみならず、観測データの質と量の圧倒的な差がその制約となる。高温高压大気中の放射伝達、さまざまな組成からなる雲の形成と放射・力学過程との相互作用など、それぞれの問題を正しく認識し、基本原理を理解してモデル化する必要がある。われわれの地球大気に対する理解がいかにか普遍性を保っているかどうか、そのモデル化が正しく物理法則に基づいたものであるかどうか、惑星大気モデル開発と観測による検証を通して試されることになるだろう。

有効な惑星探査計画を立案するための観測システムシミュレーション実験 (OSSE)、探査機観測データと惑星大気モデルの融合を図るデータ同化など、これまで地球大気の研究で重要視されてきたことが、そのまま惑星気象学の新展開に当てはめられる時代となっている。地球および惑星科学のそれぞれの発展のためには、地球での気象学・気候学のさまざまな知見・経験の集積を惑星研究に適用し、さらに惑星研究で得ら

れた新知見を地球の気象学・気候研究にフィードバックする、という相互作用の形が理想である。その際、地球科学と惑星科学は相互に密接に関係しながらも、一方では、それぞれに独自の様相も強いことを認識しておく必要がある。地球科学は地球温暖化研究や数値天気予報モデル開発など社会と直接的に関係する応用科学的な側面をもつが、惑星科学は基本的に人間の知的興味に基づく基礎学術の側面が大きい。それぞれの学問分野の独自性を認識しつつ、協調して研究を進めていける体制を確立することが肝要であろう。惑星科学の見地に立つ知見集積と研究展開力を担保する研究中心の設立が望まれる。

2. 気象監視・予測と災害科学

2.1 気象災害研究

アジアモンスーン地域に位置するわが国では、暖候期には台風、低気圧・前線、梅雨前線などに伴う豪雨や強風、あるいは高潮、少雨、異常高温・低温、落雷、竜巻、霧などが発生し、寒候期には日本海沿岸を中心として豪雪・突風・落雷、異常低温などが発生している。そうした現象に伴い、地形的要因に人口の偏在などの社会的要因も相まって、洪水、浸水、土砂崩れ、山火事、干害、雪崩、着雪、家屋の倒壊、農業被害、交通障害、通信障害などの災害が発生しており、それらによる人的・経済的損失を軽減することは社会的に大きな課題である。関連分野の研究者は災害をもたらす現象の実態を解明し、その成果をもとに監視・予測・災害軽減のための技術を開発し、その成果を国や自治体の防災業務に反映させ、災害の未然防止や軽減に貢献しなくてはならない。

第二次世界大戦後のわが国における気象災害の変遷を概観すると、1950年代までは疲弊した国土のもとで台風を主因とする大規模な気象災害が多発したが、1960年代には災害対策基本法の制定、河川改修・砂防事業などの社会基盤の整備、北陸豪雪特別観測などによる現象の理解、富士山レーダーに代表される観測システムや数値予報の展開により気象災害は減少傾向に転じた。1970年・1980年代には、梅雨末期集中豪雨観測などによるメソ気象学の興隆、静止気象衛星・アメダス・デジタルレーダーの展開などによる観測網の充実、数値予報の高度化などにより気象災害は減少した。1990年代から現在にかけては、つくば域降雨実験・X-BAIU などの研究観測や高度化された数値モデルによるメソ現象についての理解の向上、ドップラー

レーダー・マルチパラメータレーダー・ウィンドプロファイラ網・GPS 可降水量観測網・雷監視システム、また、アメリカで発生したダウンバーストによる航空機事故をきっかけとして晴天乱流を検出するためのドップラーライダーなどの展開が進んだ。さらに、メソ数値予報モデル・4次元データ同化技術、降水や竜巻に関するナウキャストの実用化などが見られた。

こうした研究や技術の進歩にもかかわらず気象災害の発生は後を絶たず、被害者数はほぼ横ばいの状態である。近年では局地的大雨による浸水害など都市化に伴う災害の増加、落雷害の高度情報化社会への影響等、社会の脆弱化に伴う災害の増加が新たな問題となっている。一方、少子高齢化社会を迎えハード防災への予算の制約がある中、山間地等の過疎化・高齢化が進んでおり、避難のあり方も含め防災情報の利活用の改善が大きな課題となっている。海外では2005年のハリケーンカトリーナや2009年のミャンマーのサイクロン、2013年の台風ハイエン（30号）など強い熱帯低気圧の襲来や、2011年タイの広域水害をはじめ、少雨、異常高温・低温などによる災害が頻発し、国内においても短時間強雨の頻度の増加や竜巻被害が見られ、これらと地球温暖化との関連が研究面だけでなく社会的にも注目され始めている。さらに、福島第一原子力発電所事故で放出された放射性物質の精度の高いモニタリングと予測、再生エネルギーの利活用のための気象予測など、防災技術と社会・経済活動とが以前にも増して緊密に結びつきつつある。

2.2 気象監視・予測のための観測システムの発展

わが国の気象観測は従来、地上と高層気象観測などの総観気象の解析が主目的であった。1970年代を境に、防災を主目的とする観測網の展開が加わり、アメダス、気象レーダー、静止気象衛星が日本列島を常時監視する体制が構築された。これにより総観規模現象と甚大な気象災害をもたらすメソスケール現象との関連が科学的に明らかになった。こうした成果をもとに、最近20年では、ドップラーレーダー・ウィンドプロファイラ・GPS 気象学・マルチパラメータレーダーなどに代表される新たな観測システムが研究機関や大学で研究に導入され、特別観測や数値モデルとの共同作業によって現象理解が進む一方、システムのハード・ソフト面での改良が進んだ。その結果、それらがネットワークとして気象庁や国土交通省河川局（現 水管理・国土保全局）などの業務において展開され、現在では世界的にも有数の高密度な観測データが

常時提供されるようになっている。

こうした観測システムや数値予報の進化により、一般には「日々の天気予報は良く当たる」といわれるようになったが、災害をもたらす現象の予測が十分にできるようになったかというそれは疑問である。その一因はメソスケール現象の機構解明が未だ不十分であることにある。メソ気象学は多くの研究者の努力にもかかわらず総観気象学のような確立した学問体系が成立しておらず、この分野は依然として科学として未成熟である。観測システムにおいても対流圏下層の水蒸気鉛直分布や大気境界層観測においては依然として不十分な面が多く、計算機性能の限界もあり積乱雲の予測に十分な分解能ではないことから、数値予報のメソスケール現象への信頼性は未だ十分とは言えない。

現在、気象庁においてはメソスケール現象に関しては、数値予報と実況の運動学的手法による予測を統合し、予報担当者の総合的な判断のもとで予警報等の発表を行っている。この中で、レーダーと雨量計データに基づく解析雨量は雨量実況の基盤データとして重要であり、それをもとに解析雨量と運動学的予測と数値予報を組み合わせた降水短時間予報、洪水や土砂災害の危険度の予測を行っている。また、近年では1時間先までを対象とする降水ナウキャスト・雷ナウキャスト・竜巻発生確度ナウキャストといった観測と予測の中間的形態としてのナウキャスト防災技術を充実させつつある。今後は1時間より先の予測精度の向上および災害発生直前の予測が課題とされている。また、降雪に関しては、レーダー雨量に比べてレーダー降雪量の測定精度は格段に悪く、かつ雪雲は地形効果も大きいことから、雪雲に対しては上記の手法のさらなる改良が必要である。

メソスケール現象の理解には観測・数値モデルの進歩とともに総観気象、大気境界層、雲物理、雲力学、放射過程などさまざまな学問分野を進展させ、それらを総合化しメソ気象学を理論的に体系化した学問に発展させることが必要である。そのため、観測面においては現在手薄とされている対流圏下層や大気-地表面過程などの観測技術と観測システムの開発、降水発生初期の雲物理的観測の充実、降水雲内の雲物理・雲力学の新たな観測システムの開発が必要とされる。また、各種の地球観測衛星の連携によって、上層の気温・水蒸気・放射に加え、雲水・雲氷、雨水・雪水といった雲物理的要素の観測も近年では可能となっている。

今後、衛星については、2014年打ち上げ予定の静止気象衛星の高頻度・高解像度・多チャンネル観測の利活用の推進を図るとともに、静止気象衛星へのサウンドの搭載や各種の地球観測衛星によるメソスケール現象の常時監視体制を構築することが課題である。また、雲や降水の予測精度を向上させるため、航空機観測等による水蒸気の鉛直分布の観測の強化、急激に発達する積乱雲やメソサイクロンを監視するフェーズドアレイレーダーの実用化等が課題である。さらに、こうした多様な観測データを最大限に有効活用するための4次元データ同化技術や観測システム研究・予測可能性実験計画（THORPEX）に見られる機動的観測技術の研究などを発展させ、観測と予測の融合的進化を図る必要がある。

2.3 気象予測システムの発展

2.3.1 気象予測システムの現状

気象予報の基本は、世界の観測データを収集しそれを解析して気象予測を行い、その成果をリアルタイムで社会に伝えることである。この技術の原点は19世紀に確立したものであるが、第二次世界大戦後の電子計算機の誕生とともに、物理法則に基づき初期値問題として予測を行う数値予測手法が発展し、予測精度の向上に大きく貢献している。わが国における数値予測技術の開発においては、世界から遅れることなく早くから大学と気象庁の共同で取り組みが進められ、1959年のIBM704の気象庁への導入とともに数値予報業務が開始された。

その後、数値予測技術はスーパーコンピュータや計算技術の発展とともに、モデルの空間分解能・物理過程の精緻化と観測データから初期値を作成するデータ同化手法の高度化等の改良が進められ、また観測面でも全球を網羅的に観測できる衛星観測の発展とともに観測データの充実が図られている。その結果、総観規模現象の予測精度の指標として国際的に比較されることが多い北半球500 hPa 高度場の誤差で見ると、過去20年間で同じ誤差で予報できる期間が10年で1日程度の割合で延長している。台風の進路予測誤差についても同様の精度向上が達成されている。世界の先進数値予報センターの中では、欧州中期予報センター（ECMWF）が一步抜き出ているが、それに続く米国、英国とともに日本は2位グループに位置している。

一方、日本のメソ数値予報については、データ同化手法として4次元変分法を世界に先駆けて導入したほ

か、前節で述べたようにドップラーレーダー、ウィンドプロファイラー、GPS 可降水量データ等の新たな観測技術の導入とともにその利活用技術を開発し、降水予測の精度を着実に向上させてきている。予報モデルには非静力学モデルが導入され、水平分解能2 kmの局地モデルが業務運用される段階になってきている。日本列島の地形の複雑さを反映した詳細な気象解析・予測を行う上で、今後もさらに細かな水平分解能の数値予報モデルの運用が期待される。一方、大雨・大雪災害をもたらすメソ対流系について、現象の発達・衰弱・移動を時間・場所を明確に予測するには至っておらず、個々の積乱雲の予測技術はさらに難しいのが実情であり、メソ対流系についての知見の確立、予測に必要な観測技術、特に水蒸気を対象とした観測の発展が必要である。

全球数値予報においては、特に予測時間が長くなるとともにカオスの影響も加わって単独の数値予報から得られる情報では不十分であることから、アンサンブル手法を導入している。世界に先駆けて数値予測に基づく1か月予報の発表を行うなど、世界的にも最先端の技術を有している。アンサンブル予報の基盤技術となる予測可能性研究については、気象学会と気象庁との共同の取り組みとして気象研究コンソーシアムの立ち上げ、アンサンブルデータの大学等での研究利用の推進が図られている。今後はメソ予報分野も含めさらにアンサンブル手法の拡充が図られる計画である。

予報発表においては、数値予測資料とナウキャスト資料とともに、観測実況を参考に予報官が判断を行っており、マン・マシーン・インターフェースである予報作業支援システム（YSS）が重要な役割を果たしている。このシステムの新たな設計のもとで、市町村を単位とするこれまでより精細な警報発表が2010年から運用されている。YSSで作成された予報等は、アデス（気象情報伝送システム）を通じて関係機関に提供される。地震・津波・火山等の情報とも合わせ、365日24時間絶え間なく発信される情報は社会システムに組み込まれ、防災、交通機関、産業利用からテレビの天気予報等さまざまな分野で活用されている。

2.3.2 気象予測システムの課題と今後の展望

天気予報や台風予報等は、国民生活に必要なものとして定着したが、予測情報が十分に使われず実況情報で判断されている分野も少なくない。この要因として、第一に予測精度が利用側の判断には不十分な場合があること、第二には情報価値があるはずなのに

さまざまな要因で利用されていないこと、と分析される。以下では、予測精度の向上と予測情報の利用推進に向けた課題と今後の展望を記述する。

(1) 予測精度の向上に向けて

①モデル高分解能化に向け、高分解能にふさわしい力学過程・物理過程の開発、次世代計算機に適合した高速化を推進する。今後10年で現業気象予測が目指す分解能は、全球モデルで10 km 程度、領域モデルで1 km 程度であり、アンサンブル予測ではそれぞれこれよりやや粗い分解能となる。力学過程としては、全球非静力学モデルの開発が喫緊の課題である。

②モデルの物理過程を LES や観測データ等を用いて徹底的に検証し、物理モデルとしての精緻度を向上させる。高分解能化とも共通して、各分野の専門的知見の集約、観測実験との連携等が課題である。特に、今後10年で目指す分解能を踏まえ、雲物理過程（特に雪雲）の精緻化を進める一方、数 km から20 km 程度の分解能でキーとなる積雲対流の扱いについて、現業分野と研究分野と連携して改善を図ることが重要である。また、モデルの鉛直分解能に合致した各種気象要素の鉛直変動もモデルに取り込むことが重要であり、これについては、秒単位でのデータ取得が可能なGPSゾンデの貢献が期待される。

③観測データの情報価値を最大限引き出すデータ同化システムの開発を進める。特に雲スケールでのデータ同化については技術革新が必要である。

④衛星観測を含め予測精度向上に有効な観測システムの提案を行う。新規観測が実現する際には早期に利用技術の開発を行う。また既存の観測システムについてもその利用手法を改善して精度向上を図る。国際的な枠組みのもとで、衛星観測等も含め観測分野と予測分野との連携が必要である。

⑤気象研究コンソーシアムを利用した予測可能性研究の推進等を通じてアンサンブル予測の確率密度分布の精度向上を図る。確率情報の利活用を推進するうえで、確率としての精度向上を図ることは重要である。

(2) 予測情報の利用推進に向けて観測・数値予報技術の進歩と並行して、気象予測から災害予測への翻訳技術や伝達手段を改良するとともに、防災情報の伝達と災害避難等のあり方を研究する情報・社会学分野との連携がおそらく最も喫緊かつ重要な課題である。これらの実現には、日本気象学会が先頭となるとともに、水文学・土木工学・地質学・地理学・社会学等の関連学問分野やマスコミとの連携・学問発展サイクル

の強化や、これらにまたがる境界領域分野の育成が必要である。

気象解析・予測結果は、防災のみならずさまざまな社会経済活動への高度な利活用を推進する必要がある。特にグローバル化した企業活動を支える戦略的情報、再生エネルギーの効率的運用の基盤情報といった分野は、産学官の連携のもとで国家プロジェクトとして進めていく必要がある。

原発事故による移流拡散予測が大きな関心事となったが、原発事故のみならず、テロ、火山噴火、工場事故等、有害物質の移流拡散予測は国家の危機管理情報として重要である。この予測精度を担保する上で、風等の気象解析・予測精度の向上を高めることは重要であり、観測から予測までの技術発展を進める必要がある。また、危機管理や拡散物質の専門分野との連携を図ることも重要である。

気候変動に伴い災害をもたらす顕著現象の増加が懸念されている。アジア・太平洋地域の先進国として、アジアモンスーンに関係する梅雨、豪雨や豪雪、少雨の研究、熱帯低気圧に伴う研究についてこれまで以上に研究者・学界間の連携（情報交換、研究者交流、会議の開催、研究コンソーシアム等）を深めるとともに、観測システムから防災情報、避難等への活用までパッケージとしての技術協力ができるよう、気象学と水文学の連携を軸に産官学の連携体制を構築することが、世界およびこの地域の気象災害の軽減に向けて重要である。

2.4 黄砂および火山灰による災害と予測

近年、しばしば黄砂が観測される。黄砂は、タクラマカンやゴビ砂漠、黄土高原などの中国やモンゴルの砂漠域で強風によって空中に巻き上げられた黄砂粒子が、上空の西風によって日本付近まで運ばれてきた現象である。視程障害や交通障害を起こし、洗濯物を汚し、農作物に被害を与え、健康障害の原因ともなる。日本における黄砂は、かつては春の現象であったが、最近では年間を通して発生し回数も増加している。発生地に近い中国や韓国での被害は一層深刻で、東アジアの共通の問題である。黄砂について、気象庁では目視による観測を、環境省ではライダーによる観測をそれぞれ実施し、気象情報の一つとして提供されている。また、静止気象衛星や地球観測衛星 AQUA 搭載の MODIS、CALIPSO 搭載のライダーにより、グローバルな分布や鉛直分布も観測されるようになった。最近では数値モデルによる黄砂の予測情報も一般に提供

されるようになった。数値モデル（移流拡散モデル）では、黄砂の発生（大気中への巻上げ）を適当に推定（パラメータ化）し、その後の輸送や降水による捕捉（洗浄）などを計算する。ただし、発生過程のパラメータ化は難しい問題で大きな誤差要因であり、精密化を図る必要がある。また、エアロゾルの衛星観測データを同化し、初期条件の精度向上を目指すべきである。黄砂は自然起源のエアロゾルであるが、これとは別に人為起源のエアロゾルも日本に運ばれる。人為起源のエアロゾルは、次章の課題である。ただし実際には、人為起源のエアロゾルも黄砂と同時に運ばれ複合的な災害を起こすので、両者同時に対処する必要がある。

黄砂と同じく大気中の微量物質の危機管理情報として重要な火山灰情報について述べる。火山灰は風に流され、噴火規模に応じ火山から離れた地域にもさまざまな影響を及ぼす。また、例えば1991年のピナツポ火山噴火のような大規模な噴火時には、成層圏にも大量の火山灰（火山性エアロゾル）が注入され、大気大循環を通じて地球全体に拡散し、放射収支に影響して平均気温の低下など地球規模の気候変動を引き起こすこともある。

火山灰の直接の影響としては、航空機や道路、鉄道等の交通障害、農業被害、健康等の生活被害等があり、火山噴火の状況把握と大気による移流拡散を組み合わせた情報提供をさらに充実させていく必要がある。また、火山灰放出の定量的な把握が困難な場合が少なくないことから、移流拡散モデルと合わせ大気中の火山灰モニタリングが重要であり、陸および衛星からのライダー観測や次期静止気象衛星に搭載される多チャンネル観測の解析技術等が期待される。さらに、噴火現象の規模の把握のため、気象レーダーや気象衛星データの気象観測技術の活用が期待される。

特に、地球規模の気候変動を引き起こす可能性がある大規模噴火については、火山灰（火山性エアロゾル）のモニタリング、地球規模の移流拡散予測、放射への影響推定、気候変動予測等、気象学の知見を結集して政策判断等を支援していく必要がある。

2.5 気象情報の提供と利活用の拡大

気象学の進歩および気象衛星やウィンドプロファイラーなど観測技術の発展があいまって、今日の気象予測技術は飛躍的な進歩を遂げ、社会に提供される気象情報は質・量ともに充実してきた。このような環境の中で、1995年には天気予報が自由化され、気象庁だけ

でなく要件を満たせば民間気象事業者においても、短期予報から週間予報そして季節予報まで発表することができるようになった。注意報や警報などの防災情報の発表に関しては今でも気象庁の専管事項となっているが、それ以外の多種多様な気象関連情報が民間の気象サービスとして提供されている。2013年1月1日現在、115の予報業務許可事業者があり、それぞれ創意工夫を凝らした気象情報を社会に提供している。一般国民は自分の目的に応じて必要な情報を選び出して利用できるばかりではなく、自らが情報提供者となる時代となった。

気象情報としては気象庁が発表する警報や注意報、気象情報などのように、防災を目的とした気象情報と、各種産業での利用を目的とした気象情報や一般生活上で利用される気象情報などがある。防災を目的とした情報は、気象業務法に基づき気象庁が発表し、都道府県の防災部局等を通じて市町村へ、また報道機関等の協力を得て住民のもとへ届けられ、防災対応に活用されている。また産業利用を目的とした情報としては、古くから農業気象や電力気象あるいは航空気象という分野があるように、それぞれの目的に沿った研究や技術開発が行われ、その成果はそれぞれの分野で活用されてきた。また陸上や海上交通の安全のためにはそれぞれの目的に合った気象情報を活用しており、その他のエネルギー産業や家電産業、アパレル産業、食品・飲料・酒類製造業、流通小売業など、ほとんどあらゆる産業において計画的な製造や販売のため、短期予報から季節予報までその目的に合った気象情報を活用している。また民間気象事業者からは、洗濯指数や洗車指数、ビール指数、UV指数といった気象に関する指数なども、まさに生活に密着した情報として、さまざまに工夫をこらして提供されている。

なお、航空気象分野では、安全運航のため晴天乱気流や火山灰等の情報、効率運航のための上層風予測等、他分野と異なり上空の気象情報のニーズがあることが特徴である。今後は、世界的に推進されている次世代航空交通管理に向けて、その基盤として位置づけられる4次元気象データベースの構築等、気象分野からの貢献が期待されている。

気象学・大気科学の成果として、観測データそのものあるいはさまざまに処理・加工された予測資料などとして社会に提供されており、さらに一般の生活情報や社会情報などと結合した多様な情報の形としても利用されている。季節予報や週間予報はもちろん、最近

は竜巻や突風あるいは台風や異常天候早期警戒などの情報などが、確率をつけた予測情報として提供されている。今後はさらに、このような確率をつけた予測情報が多く提供されると見込まれるが、確率をつけた予測情報の利活用については、提供する側も利用者側もその効果的な使い方が確立されていない。気象学会としては、このような確率のついた予測情報の利活用をはじめ、さまざまな予測情報の有効な利用についても研究開発を進めていく必要がある。

近年は、地球温暖化に関する社会からの要請も強く、従来の天気予報や気象警報・注意報ばかりでなく、政策決定における判断材料の一つとして、幅広い大気科学の研究成果が求められるようになってきた。また、近年は天候リスクによる企業の損失を回避するために、気象要素を対象とした金融派生商品としての天候デリバティブも開発されている。今後は社会のあらゆる分野でますます気象情報の重要性が増してくると考えられることから、予測精度のさらなる向上はもちろんだが、「気象情報の効果的な使い方」および「行動につながる情報提供のありかた」についての検討が望まれる。さらに東日本大震災による原子力発電所の事故を受けて、今後のエネルギー政策の転換は社会的に重要な問題となるであろう。特に太陽光、風力、水力等再生可能エネルギー関連産業が発展しており、これらの分野における気象情報の活用に向け、理学・工学間の連携のもと、気象専門家の活躍が期待される。

3. 環境の科学として

3.1 ローカルな環境問題（都市環境問題）

1980年代には、ようやく収まり始めた大気汚染の経験に基づき、事前に大気汚染を防止するように事業計画を設定することを必須条件とした環境アセスメントの考え方とその手法がほぼ形づくられた。1992年のRio サミットを契機として1993年に成立した環境基本法では、1) 人の健康が保護され、および生活環境が保全され、並びに自然環境が適正に保全されるよう、大気、水、土壌その他の環境の自然的構成要素が良好な状態に保持されること、2) 生態系の多様性の確保、野生生物の種の保存その他の生物の多様性の確保が図られるとともに、森林、農地、水辺地等における多様な自然環境が地域の自然的社会的条件に応じて体系的に保全されること、3) 人と自然との豊かな触れ合いが保たれること、4) 環境への負荷の低減、の4

つの考え方が示された。この考えに基づき、1997年の環境影響評価法では、大規模な開発行為を実施する事業者が環境アセスメントを実施することを義務づけ、その中でわれわれの環境を持続的に維持するための社会的コンセンサスを得るうえで必要な手続きが決められてきた。この間、個人的にこの分野に貢献する研究者はあったが、残念ながら、気象学会は、学会として手法の技術面について学術的な評価や批判を行うなどはなかった。

ローカルな大気環境問題を語るときの一つの重要な転機は、気象庁が2001年に数値予報プロダクトであるGPVを(財)気象業務支援センター経由のリアルタイムのオンラインデータで本格的に提供するようになったことであり、これによってメソスケールの大気汚染に関連する実現象の解析が飛躍的に進んだ。また、民間でも光化学大気汚染や浮遊粒子状物質汚染の解析を進めることが可能となり、各自治体における大気汚染のメカニズムの理解やその対策が進んだ。しかし、大気汚染問題の中で光化学大気汚染や微小粒子状物質PM2.5、都市域の道路沿道における汚染の問題は未解決の課題であり、いずれも複雑な大気中の化学反応や都市構造物の影響を受けるものである。また、世界中で都市への人口集中が深刻になってきている中、東京では年平均気温がこの100年に3°C程度上昇しており、今後さらに地球温暖化とヒートアイランド現象が重畳して起こる懸念がある。このような都市のさらなる温暖化は冬季の寒冷ストレスを緩和するものの、夏季においては軽度のものから重篤なものまで人間健康に被害を及ぼし、また過大なピークエネルギー需要につながるため、早急に対策を講じていく必要がある。

以上のような背景を踏まえて、この分野で今後必要な研究を、基礎研究から社会への学会への貢献として考えるべき課題順に並べると次のようになる。

- ①現状の平坦・一様・定常の前提の下に作られている大気境界層理論から脱却した、地形や建物の影響を受ける非定常現象の普遍的な記述（乱流現象を含む）とモデル化
- ②都市における最大のエネルギー源である日射や都市降水に深く影響する雲の放射を含めた放射モデルの高精度化（1.3にも記載）
- ③これらの課題の改善を基盤とした紫外線量や大気中の液体水量等に依存する各種化学物質の大気中反応の解明

- ④ローカルな大気化学反応に関わる VOC (揮発性炭化水素) を発生する植生や海洋など自然発生源の理解
 ⑤環境に関連するモデルの精度検証に使用する指標とその範囲を定める手順に対するコンセンサスの形成
 ⑥社会の必要に応じた新しい観測手法が実用化された場合、それを行政手続きに使用する際のガイドラインの制定および普及

この中で②は、植物の光合成活性に関連し、農業分野や炭素循環にとっても重要である。また②③④は、植生等によるエアロゾルの発生→雲の発生→日射への影響等を通して相互作用をしている可能性もあり、他分野と連携を図ってこれらを解明していくことが重要である。

最後に、実際の現象と数値モデルの結果を比較するためには、「平均」の概念をもっと明確にする必要がある。実際の観測データは特定の時空間の平均値であり、数値モデルと比較する際には、同じ時空間平均値と比較すべきである。しかし、気象の数値モデルがどのような平均を計算しているのか明確に語られることは少ない。数値モデルがどのような平均を計算するように設計されているか、注意を喚起していく必要がある。

3.2 人為的排出ガスとグローバル大気環境問題研究

気象研究所(当時)の忠鉢 繁会員は、1982年9月に南極でオゾン全量の大幅な減少を世界で初めて観測し、これがオゾンホールが発見につながった。その後、気象学者・大気化学者らにより、南極での春先のオゾンホールの発生原因は、人為起源のフロンガス等によってもたらされたことが明らかにされた。この発見事実は、1985年「オゾン層の保護のためのウィーン条約」の発効に引き続く1987年の「モントリオール議定書」の批准・発効や1990年代以降の議定書改正の大きな推進力となった。その後の観測により、南極オゾンホールの拡大に歯止めがかけられたことが明らかとなり、あと数十年後には1980年代以前のレベルへ回復する見込みとなった。これは、大気科学が地球環境の保全に大きな役割を果たしうる実例となった。

一方、地球温暖化に大きな影響を与えられとされる二酸化炭素に関しては、1950年代に米国により精密な観測が開始され、以後世界各国で世界気象機関(WMO)や地球圏-生物圏国際協同研究計画(IGBP)等のさまざまな研究プロジェクトの元で観測ネットワークが拡大してきた。当初は地上のみで

あった観測も、定期旅客機・船舶からの観測に加え、2000年代以降は衛星による観測も行われつつあり、世界的な観測ネットワーク構築は大きく前進した。これと呼応する形で、数値モデル開発や、数値モデルと観測を用いて最大の不確定要素である地域ごとの二酸化炭素フラックスを推定する研究も、2000年代から大きく進展している。

グローバルな大気環境と数値モデルによる評価の精度向上には、長期かつ広範囲にわたる同質の観測データが必要である。放射計については品質管理(QC)を行う国際的な仕組みがあるものの、人為起源ガスやエアロゾルについては、十分とはいえない。国際的な観測標準やデータのQCに対する取り組みが必要である。1989年に全球大気監視(GAW)計画が策定され、温室効果ガスはモニタリング標準について基準があるものの、圧倒的に観測地点が少ない現状である。一方、他の人為起源物質は、GAWの測定項目に入っているが、QCの国際的取り組みがないため、精度等に問題が残っている。

2000年頃から、東アジアの大気環境に関する大型プロジェクトが次々と実施され、同地域の大気環境に関する理解とモデルによる再現・予測性が大きく進歩した。また、人為起源ガスやエアロゾルが直接効果や間接効果により気候に与える影響については、IPCCでも大きな不確定要素と指摘されていたこともあり、観測と数値モデル双方の研究が近年大きく進展した。

東アジアでは、わが国の研究者が中心となり、放射計、ライダー、酸性雨モニタリング等、大気環境に係わる観測ネットワークが整備されるとともに、国内においてもエアロゾルと大気環境に関する集中観測サイトが維持運営されている。WMOは日本の気象庁が運営する「WMO温室効果ガス世界資料センター(WDCGG)」を通じ、世界で行われた観測の成果を各国政府、研究機関に公表している。さらに、2000年以降次々に地球観測衛星が運用開始され、搭載された温室効果ガスや人為起源エアロゾルのセンサー情報が利用可能となり、東アジアの大気環境の実態把握と理解は大きく前進した。

また、この頃から全球大気エアロゾルモデル、全球化学気候モデル、領域エアロゾルモデルなどが開発され、東アジアの大気環境の再現と予測が進むとともに、この中で開発されたエアロゾル・大気化学過程は、気候モデルにも組み込まれ、温暖化予測研究に多大な貢献を行ってきた。

こうした観測と数値モデル研究の進展と軌を一にするように、エアロゾルなど大気微量物質についてデータ同化技術の開発が2000年代後半から大きく進展した。同時に、各研究機関や研究者の努力により、東アジアにおける大気汚染物質や温室効果ガスの排出インベントリーも、整備が進められた。

大気環境モデルに関しては、エアロゾル粒子の生成・凝縮・凝集・内部混合にいたる諸過程や多種多様な大気化学過程が取り入れられ、ますます複雑な数値モデルへと進化しているが、精度保証のための検証が重要となっている。多様なエアロゾル大気化学過程が存在する東アジア域で、ネットワーク観測、地上拠点における集中観測、航空機観測、衛星データ解析並びに電子顕微鏡による粒子解析などを有機的に組み合わせた観測・モデル連携研究の一層の推進が必要である。

大気環境のデータ同化は、黄砂・オゾン・二酸化炭素については開発が進んでいるが、エアロゾル各種や人為起源ガスへの拡張を行うことにより、観測と数値モデルを結合した全球大気環境の監視・予測の高精度化にむけた努力が必要である。また、インベントリーについては、ボトムアップのエミッションデータセットは信頼性の点で問題がある。質の高いエミッションインベントリーは、モデルによる大気環境の評価と予測の高精度化に必須である。さらに、GOSAT (いぶき)、GCOM-C1, EarthCAREなどの地球観測衛星を利用した人為的排出ガスやエアロゾル監視システムの確立が、中長期的に大きな課題である。

さらに、こうして得られるプロダクトを、東アジアの環境保全、健康影響評価や各国の自然・社会経済特性に適應した持続性社会の実現といった研究に利活用するため、他分野との共同研究や応用研究にも積極的に取り組む必要がある。

3.3 地球温暖化研究

国際的に見た近年の地球温暖化研究の進展は、1990年の第1次から2007年の第4次に至る気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 評価報告書の内容に象徴される。人為起源温室効果ガスによる気候変化が実際に生じている可能性について、観測データの整備、解析の進歩とモデル研究の進歩により、「可能性が非常に高い」と結論付けられるに至った。二酸化炭素濃度の年1%複利増加に対する気候応答の議論に始まった将来予測研究についても、現在では複数の温室効果ガスとエアロゾルを含む将来シナリオに対する気候応答が議論できるようになるとともに、炭素循環の応答、地

域的な気候変化、極端現象の変化等の研究も進展した。一方で、放射強制力に対する全球平均気温の上昇のしやすさの指標である「気候感度」の推定には、未だに大きな不確実性が残っている。

気候モデルに基づく日本の地球温暖化研究は、気象研究所を中心に1980年代から取り組まれ、その成果は1990年の第1次評価報告書に反映されている。さらに、2002年の「地球シミュレータ」運用開始を契機に、文部科学省等の大型研究プロジェクトにより、国内の多くの研究者が参加する形でより大規模に推進されるようになった。初期には、検証不可能な100年後の予測計算を行うことに戸惑いや批判も見られたが、上述のような地球温暖化研究の国際的な成熟に伴い、国内においてもその科学的意義の理解が広がった。IPCC第4次評価報告書においては、国内の複数の気候モデルグループが予測計算を提供し、その結果を解析した論文が多数引用されるなど、国際的にも一定の存在感を示した。

この間、気候変動枠組条約 (UNFCCC) 締約国会議 (COP) 等の地球温暖化をめぐる国際交渉においては、温暖化による危険な影響を避けるために温室効果ガス排出量の大幅削減が必要であることが明確に認識されつつも、その具体的な目標や国家間の分担についての合意が遅れている。このような状況において、地球温暖化研究には、1) 気候の現状と変化傾向を正確に把握すること (モニタリング)、2) 気候と生態系や物質循環の相互作用を含めた未解明のプロセスを明らかにすること (現象解明)、3) 実際に生じた変化や極端現象と温暖化の関係を理解すること (変化の要因推定)、4) 将来の気候変化を高い信頼性で見通すと同時に不確実性の幅を示すこと (将来予測)、などが社会から強く求められている。

①モニタリングに関しては、衛星観測を含めて国際的な観測ネットワークに貢献すると同時に、国内の観測点の観測環境維持などを通じて、長期的な変化傾向の分析に耐える時間的に均質なデータを継続して取得するための取り組みが重要である。

②現象解明に関しては、現象の観測・実験と直接数値シミュレーションを組み合わせる実施するとともに、プロセスレベルの知見を地球規模モデルに適用するためのアップスケーリングを常に意識する必要がある。

③変化の要因推定は、日本では本格的に取り組まれてこなかったが、国際的には方法論が存在している。今後、実際に進行していく気候変化やそれに伴って発生

する極端現象に対して、まず、そのような事象とモデルによる再現・予測計算との整合性を常に評価することがモデル検証の意味から重要である。さらに、人為起源の温暖化要因を除いた場合のモデル計算をこれらと統計的に比較することにより、実際に生じた事象が人為起源の温暖化にどの程度起因するといえるかを評価することが、科学的な理解の観点からのみならず、社会の関心に答える上でも重要である。

④将来予測に関していえば、気候感度の不確実性低減を始めとする地球規模の問題を進展させると同時に、自然変動の初期値化を含む近未来予測や、極端現象を含む地域規模の予測の信頼性を上げる取り組みが必要である。将来予測の不確実性には自然変動の不確実性、モデルの不確実性、シナリオの不確実性があるが、科学の進展と関連して特に重要なのはモデルの不確実性である。モデルの不確実性の大部分はモデル中のプロセスの半経験的な定式化（パラメータ化）に起因するため、その低減のためには、より現実的なプロセスのモデル化と、さまざまな観測データによるプロセスおよびモデル全体の検証をさらに進歩させることが必要である。

地球温暖化に社会が対処するための対策オプションの検討においても気象学・大気科学の貢献は欠かせない。適応策検討のための温暖化影響予測については言うに及ばず、緩和策（温室効果ガス排出削減）としての再生可能エネルギー利用においても気象学が貢献する（第2章参照）。加えて、近年にわかに検討が進んでいるオプションに、大規模な工学的気候改変である気候工学（ジオエンジニアリング）がある。例えば、気候工学の提案の一つに成層圏への人工的なエアロゾル注入による太陽放射管理があるが、その検討において気候モデル実験等の気象学・大気科学的な研究が重要な役割を果たすと期待されている。そのような検討により気候工学の有効性や副作用を明らかにすることには意義があるが、気候工学についての社会的判断のためには、ガバナンスや社会的受容性等を含む多角的な検討が必要であることを忘れてはならないだろう。

地球温暖化研究は、大型研究プロジェクトに参加する研究機関が中心となり進められてきた印象があるが、今後は、社会的にも科学的にも意義が大きい気象学の応用分野の一つとして、より多くの気象学者の興味の対象となり、その研究コミュニティが広がっていくことが望まれる。同時に、既存の研究グループはこれまで以上に相互の連携を密にし、モデルの開発効率

や質の向上を図るべきである。気象学以外の地球科学諸分野や温暖化影響・対策評価に関わる諸分野との連携を密にすることも極めて重要である。また、国際的な研究交流をより活発化させ、IPCC等においても一層の貢献を目指したい。

3.4 地球環境問題に関する社会とのコミュニケーション

環境問題に関する気象学から社会への情報提供としては、モニタリングデータ等の提供や、アウトリーチとしての研究成果の発信等が定期的に行われている。しかし、社会が環境問題を適切に理解して問題解決に取り組むことを気象学として支援するならば、さらなる社会とのコミュニケーションが必要である。

地球温暖化問題に関していえば、地球温暖化の科学に対する「懐疑論」が非専門家の中に根強く存在している。懐疑論の中には、温暖化の科学が過度に単純化されて語られることに対して警鐘を鳴らすといった意義のある議論も存在するが、誤解や曲解に基づく、科学として明らかに誤った議論も少なくない。そのような中で、気象学は社会に対して正しい知識を継続的にわかりやすく発信することがもちろん必要であるが、それだけで十分とはいえない。専門家と社会のコミュニケーションがうまく成立するためには、専門家に対する社会の「信頼」が重要である。信頼を醸成するために必要なこととして、科学的な主張が政治経済的な利害関係と無関係であることを不断に確認し、社会に対して説明していくこと（科学の社会的中立性）や、社会から発せられる疑問に対して真摯に耳を傾け、透明性の高い科学的議論を展開してこれに答えていくこと（コミュニケーションの双方向性）が求められる。

マスメディアは、社会とコミュニケーションをする上で重要な役割を果たすが、異常気象と温暖化を過剰に関連付けるなど扇情的な傾向があることがしばしば指摘される。過度に扇情的で不正確な報道は社会に誤解をもたらすだけでなく、気象学への信頼を損なう原因になる可能性もあるため、マスメディアに対して報道の正確性を促すことは重要である。また、個々の専門家においても、温暖化問題に警鐘を鳴らすことを社会的使命と考えて脅威を強調する者もいれば、そのような姿勢に批判的な者もいる。個々人の価値判断に基づくコミュニケーションを止めることはできないが、気象学コミュニティ全体としてはバランスのとれたコミュニケーションに努める必要がある。

地球温暖化をはじめとする環境問題に関する科学的

知見は、しばしば政策決定と強い関連性を持つ。しかし、多くの場合、最善の政策は科学のみによっては決まらず、社会的な価値判断を含む意思決定を必要とする。したがって、政策と関連性の高い知見のコミュニケーションにあたっては、科学的にいえることと、不確実性を含めた限界とを明らかにし、科学が政策決定を過剰に規定しないように配慮することが重要である。たとえば、UNFCCCのCOP等における地球温暖化の対策目標の議論に関して、IPCCに象徴される科学は選択肢を提示できるのみであり、選択肢の中から実際の目標を選ぶのは社会、あるいは政治であるという認識が重要である。

これまで、このようなコミュニケーションは主として個々の研究者やグループのレベルで行われることが多かったが、今後はより組織的に、例えば気象学会として対応をとっていくのか否か、また、どのような対応をとるのがよいかを検討する必要がある。

3.5 原子力災害に備えて

2011年3月11日に発生した東日本大震災は大津波を引き起こした。福島第一原子力発電所の原子炉は、地震と津波により冷却機能を失ってメルトダウンを起こし、水素爆発などにより多量の放射性物質を大気中に飛散させた。放射性物質は、風により広い範囲に拡散し、降水により地表面を汚染し、多くの住民から生活と仕事の場を奪った。

原子力発電所の事故は福島第一原子力発電所が初めてではない。ラスムッセン報告(1974年)では、「原子力発電所が事故を起こす確率はヤンキースタジアムに隕石が落ちるのを心配するようなものである(大規模事故の確率は、原子炉1基あたり10億年に1回)」と結論していた。しかしながら、1979年3月28日に、米国スリーマイル島の原子力発電所でメルトダウン事故が発生し、事故を未然に防ぐことの難しさが認識された。その後、1986年4月26日には、チェルノブイリ事故が発生した。大気中に放出された放射性物質は広くヨーロッパを汚染し、原子力発電所の事故は極めて広い範囲に被害を与えることが認識された。また、旧ソ連政府はスウェーデンで放射能が観測されるまで事故を公表しなかったため、混乱を一層大きくした。この事故を契機に原子力防災に国際的に取り組む機運が高まり、1990年代後半、IAEA(国際原子力機関)とWMO(世界気象機関)は、環境緊急時に数値モデルによる予測情報を即時に提供するシステムを構築した。

政府は原子力発電所の事故に備えて「緊急時迅速放射能影響予測システム(SPEEDI)」という数値予測モデルを準備していた。しかし、福島第一原子力発電所事故でSPEEDIによる試算結果の一部が公表されたのは3月23日であり、他の多くの試算結果の公表はさらに遅れた。早く公表されていれば、より適切な回避行動を選択できた可能性が指摘されている。公表が遅れた理由は「国民がパニックになることを懸念した」と説明された。チェルノブイリ事故の教訓は日本の防災に生かされなかった。このような判断に至る真の理由を明らかにし、情報提供のあり方を徹底的に見直す必要がある。

3月18日に発表した気象学会理事長名のメッセージは、SPEEDIの情報が公開されることを前提として、当学会の関係者に数値予測情報の提供や研究者間での交換に対する注意を喚起したものであった。このメッセージにおける「単一の情報を提供し、その情報に基づいて行動する」という表現が、研究と表現の自由の制約と受け取られ、批判を招いた。気象学会は、緊急時においても、研究と表現の自由を尊重すべきである。また、学会としての緊急時の情報発信のあり方については、さらに議論を深める必要がある。

大気による拡散および地表面への沈着は、気象学の重要な研究テーマであるが、これまでは放射性物質を対象とした拡散の研究は、チェルノブイリ事故の直後を除けば、気象学会で報告されることは少なかった。気象学会は、関連する研究支援を強化するとともに、得られた知見を原子力防災に生かすために努力すべきである。福島第一原子力発電所事故の放射性物質拡散については、今後、関連諸科学と連携をとりながら、徹底的に検証する必要がある。また、検証結果は、原子力防災システム構築の際の貴重な資料として役立つために、世界中の防災担当者や研究者に公開されなければならない。

放射線量モニタリングのあり方は気象学的立場で再検討する必要がある。モニタリングネットワークは原子力発電所から10 kmの範囲に集中的に展開されていた。その根拠は、放出源から10 km程度離れると大気中濃度が急激に減少するという試算(原子力安全委員会:原子力施設等の防災対策について)であった。しかしながら、チェルノブイリや福島の事故においては、大気中濃度より地表面の汚染の方が深刻である。降水は、気柱全体の放射性物質を集めて落下し、乾燥によって濃縮され、10 kmをはるかに超えたところに

までホットスポットを形成する。湿性沈着を想定せず発電所周辺に限定したこれまでのモニタリングシステムは不十分で、日本全土をカバーする広域的な監視ネットワークを構築しなければならない。また、拡散と沈着量を監視するため、降水中に含まれる放射線量測定や風や降水などの気象観測を並行して実施すべきである。

数値モデルによる予測は不確実性があるものの、それでも有用な情報である。福島第一原子力発電所事故では、SPEEDIのデータ公開が遅れたことが大きな問題となった。特に、放出量が不明で予測の不確実性が大きいことが、公表を遅らせた一つの要因とされている。しかし、放射性物質による汚染の場合は、最悪を想定して早く対策を考えることが大切である。政府・防災機関は、単位量放出を仮定した予測でも有効活用の方法を検討すべきであろう。また、国内外の機関で予測資料が得られた場合には、精度を精査したうえで、セカンドオピニオンとして利用することを検討すべきであろう。

気象学会は、SPEEDIなど放射性物質拡散のための数値予測モデルの研究・開発を積極的に支援すべきである。数値モデルの基本的なフレームは、利用目的と計算精度を十分考慮して設計する必要がある。拡散や沈着などの物理プロセスでは精度の高い経験的なパラメータを調査する必要がある。また、放出量推定のために、データ同化による逆推定の技術開発も必要である。予測結果には、放出量や拡散・沈着過程、風や降水量の予測誤差などさまざまな不確実性が含まれる。不確実性の評価手法や表現手法についても研究を進める必要がある。特に、不確実性を含む情報はさまざまな風評被害の原因となる。情報提供のあり方に関しては国民的な合意形成に努力すべきである。気象学会は国民的なリテラシーの向上に努力するとともに、政府・防災機関に対して、専門的な立場から、放射性物質の拡散予測システムとその運用に関する助言や提言を積極的に行うべきである。

4. 学術活動の展開と連携

4.1 学際科学としての研究推進

本稿の各所で述べられているように、地球システムの理解において、またさまざまな環境問題への対応において、他の学問分野との協働が求められると同時に、そこでの気象学の果たす役割は大きい。「学際科学」の厳密な定義には踏み込まず、ここではこれらを

「学際科学」と考えることにし、本稿で挙げられている例を列挙しつつ、若干の提言を試みる。

例えば、地球システム科学においては、大気と海洋や陸面・陸域植生など他の部分系との結合過程の理解が重要である。さらに、気象学が対象とする大気との結合過程としては、水文、雪氷、電離圏、高エネルギー粒子、大気微量成分（化学組成）など多岐に渡る。大気微量成分（化学組成）に関わる研究は大気化学分野の主対象であるとは言え、今や、その動態や放射過程との相互作用など気象学の主要な一分野をなしていると言っても過言ではない。

街区などミクロスケールや都市域の大気環境問題（大気汚染やヒートアイランドなど）、越境大気汚染、半球規模大気質変化、地球温暖化などさまざまなスケールの環境問題においては、気象学が中心的な役割を果たすものの、問題の空間スケールに応じて大気化学、海洋、陸面との相互作用の研究や、影響評価のためには影響を受ける側の諸分野との、対策評価のためには工学や社会学・環境経済学などとの連携研究が重要となる。放射性物質の拡散など原子力発電所の重大事故などに起因する問題についても同様に、関連諸分野との連携した研究が日頃から不断に積み重ねられていることの重要性が、東日本大震災以降改めて認識された。

気象災害の低減に関しては、防災気象情報の有効活用に基づく確な避難など、気象学と他の分野、例えば水文学、土木工学、地質学、地理学、社会学などとの連携の強化、境界領域分野の育成が必要とされている。また、利用者の意思決定に役立つ情報をいかに提供していくか、情報工学系や社会学系の研究者との連携が必要となる。

農業分野や産業界において大きな気象リスクを持つ利用者、あるいは太陽光や風力など自然エネルギーの利用推進に対しては、気象予測情報から有用な情報を抽出するための研究として、新たな取り組みが必要である。一方で、地球温暖化問題への対処としてジオエンジニアリングの議論がなされつつある現在、地球システム科学の立場から適切な提言を行うためにも、気象学を始めとする地球システム科学分野と工学分野との協働作業が必須である。

では、これらの例に見られるような学際科学研究は、順調に推進されてきたと言えるだろうか。個々の研究者のレベルでは、さまざまな研究者間のつながりの中で、効果的な連携・協働研究がなされている例は

多い。また、競争的資金による特定の研究プロジェクトとして実施された例も多いと考えられる。しかし、学会レベルでは、組織的かつ継続的な活動にまでは至っていないというのが現状ではなからうか。学会は元来、当該分野の研究を発展させ後進を育成する上で、それぞれの学問分野で閉じて活動を行うのが有効であったことは事実であり、組織的な連携活動には向いていないという特徴を有している。しかし、上述したようにさまざまな課題に対して分野間の協働が必須となってきた今の時代においては、次への一步が求められている。気象学会においても、個々の要素研究・プロセス研究が進んできた現状において、学際的・統合的な取り組みが可能な状況となっている。

日本地球惑星科学連合 (Japan Geoscience Union; JpGU), 特に「大気海洋・環境科学」のセクションは、気象学分野と他の関連分野を結ぶ重要な学術活動の場を提供していると考えられる。他の分野との連携・協働の具体的な道筋を開いていく上で、諸学会と連携して特定の課題に関するシンポジウムを開催するなど、気象学会が JpGU の中で存在感を十分に示しリーダーシップを取ることが、われわれの進むべき重要な方向性の一つではないだろうか。

4.2 日本地球惑星科学連合

JpGU は地球惑星科学を構成するすべての分野と関連分野をカバーする7,000名以上の個人会員および地球惑星科学関連48学協会を団体会員とする学術団体である。この48学協会の一つとして日本気象学会も参加している。さまざまな学問分野から構成されている JpGU は、大きく「宇宙惑星科学」「大気水圏科学」「地球人間圏科学」「固体地球科学」「地球生命科学」の5つのセクションに分けられている。それぞれのセクションにおいては、長期的サイエンスビジョンの提示や、それに沿ったフォーカスグループの立ち上げ、年に一度の研究集会である「連合大会」におけるセッション提案、プログラム編成、セクション学術誌の企画・編集等、その学術活動全般を積極的に推進している。気象学は主に「大気水圏科学」の一分野と位置づけられる。

JpGU では総務、財務、広報等の委員会のほか、男女共同参画委員会、キャリア支援委員会、大会運営委員会等、各団体会員の活動を総括する委員会も存在している。男女共同参画委員会においては、理工学系学協会の男女共同参画を推進するための「男女共同参画学協会連絡会」にも加盟しており、2008年の同連絡会

のシンポジウムを主催するなど積極的な活動を行っている。JpGU に加盟する個々の学協会では負担の大きいこのような主催も、JpGU という大きな枠組みのもと比較的容易に行うことが可能であり、これによって、日本の科学アカデミアに地球惑星科学のプレゼンスを示すこととなる。

また、JpGU は、地球惑星科学の主要な学協会はすべて参画しているため、日本学術会議における地球惑星科学分野に関する情報集約の窓口としての機能を求められているのが現状である。日本学術会議は、「科学が文化国家の基礎であるという確信の下、行政、産業および国民生活に科学を反映、浸透させることを目的として、1949年1月、内閣総理大臣の所轄の下、政府から独立して職務を行う「特別の機関」として設立された」(日本学術会議 HP より)ものである。その職務は「科学に関する重要事項を審議し、その実現を図ること。」および「科学に関する研究の連絡を図り、その能率を向上させること。」とされている。第20期より(2006年10月～)新たな組織体制となったが、気象学に関連する委員会としては、「分野別委員会」の一つとして「地球惑星科学委員会」が位置づけられ、その下に、地球・惑星圏分科会、地球・人間圏分科会、社会貢献分科会などがある。また、「機能別委員会」の一つとして国際的な学術団体(アカデミー)との共同作業について審議するための「国際委員会」があり、これには IUGG 分科会や、その下の IAMAS 小委員会などが含まれるが、これらは関連する分野別委員会の傘下という位置づけでもある。

日本学術会議は、科学者によるボトムアップの政策提言の場として位置づけられるため重要である。たとえば、2010年3月に出された「学術の大型施設計画・大規模研究計画-企画・推進策の在り方とマスタープラン策定について-」は、結果として、その後の科学行政に大きな影響力を及ぼしている。また、東日本大震災においてもタイムリーに日本の科学アカデミアとしての提言を複数発表している。このような科学行政に日本気象学会が積極的に関わるルートを確保するのは、分野の発展のため重要なことと考えられる。

科学分野全体から見れば、地球惑星科学分野はその一つであり、気象学は地球惑星科学の主要な分野の一つではあるが、あくまで一つの分野にしか見えない。今後、日本の科学行政における気象学のプレゼンスを示していくためには、JpGU を通さざるを得ないのが現状である。現在、気象学会では、防災分野に較べて

アカデミックな色彩が強い分野で JpGU への参画が先行している。しかし、防災分野にもさまざまな学際的な課題があり、他学会と連携を図る上で JpGU の場を活用するメリットは大きい。今後、JpGU において、他分野との協同を通して気象学のプレゼンスを高め、日本学術会議へのパイプを太くしていく必要があるだろう。

その方策として、たとえば、気象学会の会員を積極的に JpGU の代議員や理事に送り出し情報を共有すること、今まで以上に JpGU の連合大会への参加を積極的に行うこと等が重要である。これまでは、特定のテーマを設けた気象学会主催のセッションが行われているが、JpGU に気象学会が十分根づいていないような印象をもたれがちである。一方、大気化学や超高層大気科学と関連が深い中層大気のセッションは、ここ数年、継続的に連合大会でセッションを設けている。これは、JpGU において気象学会のプレゼンスを示すのに貢献する反面、気象学会の春季大会での中層大気の発表は大きく減少するため、気象学会における当該分野のプレゼンスが低下している。日本気象学会は、JpGU との係わりを広くとらえ、バランスのとれた分野発展を図る方策を考えていく必要があるだろう。

4.3 国際協力と国際連携

気象学分野での国際的な協力・連携は、いくつかのカテゴリーに分類される。現在、多くの異なった形態・体制のもとで研究活動が行われており、代表的なものを以下に挙げる。この分類に属さないものもあると思われる。

1) 主としてすでに確立された大きな国際的な機関の枠組みの中で長期的に研究計画が検討・立案されそれに基づいて実施されているもの。代表的には、1980年以來、WMO (The World Meteorological Organization)、および ICSU (The International Council for Science) により、1994年からは IOC (The Intergovernmental Oceanographic Commission) of UNESCO も加わって運営している WCRP (World Climate Research Programme) などがある。WCRP の下には多くの研究計画 (たとえば GEWEX, CLIVAR, SPARC などのプロジェクトや活動) が推進されている。

2) ICSU 傘下の組織である IUGG (The International Union of Geodesy and Geophysics) の活動、あるいはこれと連携した IGBP (International Geosphere Biosphere Programme) が良く知られてい

る。

a) IUGG の下部には IAMAS (International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences) があり、さらに細分化された11の分野の委員会がある (ICACGP, ICAE, ICCL, ICCP, ICDM, ICMA, IOC, ICPAE, ICPM, IRC, CNAA)。

b) IGBP は地球圏・生物圏という地球表層環境システムを主な対象にしており、気象学の研究領域はその重要な部分を占めている。IGBP は研究を実施するためのプロジェクトであり、その下にコアプロジェクト (AIMES, GLP, IGAC, iLEAPS, IMBER, LOICZ, PAGES, SOLAS) を実施している。コアプロジェクトには国際委員が各地域から選任され国際委員会 (SSC (Science Steering Committee) あるいは SSG などと呼ばれる) を構成し、プロジェクトの国際的な連携・推進と国内の研究の推進にあたっている。

3) 南極の科学研究については SCAR (Scientific Committee on Antarctic Research) が国際協力の中心母体である。これは、南極の環境保全を担保するための相互チェック機能、国際的な協同観測の調整等を担っている。北極の科学研究については IASC (International Arctic Science Committee) が国際協力の中心母体である。北極にはヨーロッパ、ロシア、北米諸国が位置しており、各国の極地研究所を中心に長期的な観測的な研究が行われている。国内では国立極地研究所が極域研究の窓口になっている。極域は急激な温暖化やオゾン層破壊等、人間活動の影響が顕著な領域である。極域研究の推進のためには、分野の広がりや分野間の連携の必要性を考慮し、重層的で国際的な研究者の連携が必要となる。

4) これ以外にも、隣接分野も含む学際的な国際学術組織による計画や、研究の進展に伴い各国の大きな研究機関を中心にした新たな国際計画が立案されることが多い。ほとんどの場合、上記の組織と連携し、それらを窓口にして公式に提案される。この提案後、審査と承認を経たのち、研究者間での交流・連携も公式なものになる。具体的な研究活動にあたっては、それぞれの内容に対し審査と承認の手続きが必要となる場合が多い。

これらの国際協力・連携の機能の中でも重要なものはその規模に応じた国際的な研究集会・会議である。上記の計画は、相互にいくつかの母体が連携しているがゆえに共同で開催されることが多い。もちろんこれ

らの主催する会議とは別に、各国・各地域の地球科学の学術団体（AMS (American Meteorological Society), AGU (American Geophysical Union), EGU (European Geophysical Union) など）が定期的開催される会議がある。また学術団体によるものではないアジア・オセアニアにおける会議として AOGS (Asia Oceania Geosciences Society) がある。これらの場を利用した交流も活発化している。通信手段の飛躍的な発達に伴い、研究者の協力・連携の仕方も多元化・多様化してきている。気象学会では長期にわたり若手研究者の国際会議への参加のための旅費の援助を行ってきている。

気象学会に関連する研究者は、関連する国内・国際委員会の委員として国際的な活動に深く関わり大きな貢献をしてきた。気象学会の大会のプログラムにおいてもこのような国際的な活動の成果の発表の場を提供することにより、継続的に支援してきた。

東アジアでの気象学研究の推進と研究者間の交流を活発化するために、2005年より日本・中国・韓国の気象学会が主催して、ほぼ2年に一度、各国で国際会議を開いてきた。東アジアにおける気象予測・災害・気候変動・環境問題に関する研究交流に貢献してきた。また AGU はアジアにおける地球科学の国際連携を継続的に行っており、AOGS との会議の共同開催も予定している。今後、日本・中国・韓国の国際会議をさらに高い水準で発展させ、より国際的な場での認知度を上げるためには、これらの学術団体や会議運営組織体との連携などを検討する時期にきている。

4.4 大型研究の推進

国際的に最高水準の気象学研究を継続的に行っていくためには計画的な大型研究の推進が必要不可欠である。もちろん、個々の研究者の優れた発想に基づく独創的な研究が、学術的な貢献という点では最も重要な要素であることは間違いない。しかし、個人あるいは小人数のグループでは行うことのできないような規模の研究およびそれを支える組織・体制の整備も重要である。このことは、最前線の気象学の研究が先端的な観測や高速の計算に大きく依存していることを考えれば明らかである。したがって、気象学会は世界の研究の動向を把握しながら、重要な大型研究の推進に必要な支援活動を積極的に行う必要がある。

以前は文部科学省に科学技術・学術関係の6審議会が設置されており、その中の一つである測地学審議会は、今後進めるべき地球惑星科学関連の大型観測の調

査・審議および答申を行ってきた。この測地学審議会を通して、多くの大型観測計画が実現してきた。ところが、2001年に中央省庁等改革の一環として、科学技術・学術審議会に統合され、測地学審議会は一つ格下げの測地学分科会となった。以来、以前の測地学審議会が果たしていた役割を担う組織がなくなり、ボトムアップの大型観測研究はほとんど認められない時代が続いた。

一方、日本学術会議は第20期にあたる2005年に大幅に改編がなされた。この新しい学術会議は、以前のような各学会に直結する活動ではなく、大きくりの分野で、現状と展望を俯瞰的に議論する場となった。会員や連携会員も互選で選ばれる。気象学は地球惑星科学委員会の中で地球惑星科学に含まれる一つの分野として位置づけられている。日本学術会議は、大型施設計画および大規模研究計画についての調査を実施し、2010年3月には「学術の大型施設計画・大規模研究計画一企画・推進策の在り方とマスタープラン策定について」と題する提言をまとめた。これは予算要求とは切り離れた調査という位置づけであったが、結果として文部科学省はこれを反映させる形で、いくつかの大型研究計画を認めることとなった。これは見方を変えれば、再びボトムアップの大型研究が予算化される道筋ができたとも捉えられる。したがって、日本学術会議は、常に各分野の大型研究計画の進捗状況、成熟度等を調査し、公正に審査する責任がある。また、現在の日本の大型研究計画の予算化は、欧米の多くの国と異なり設備に対してのみで運用費や研究費は全く考慮されておらず、競争的資金に頼る不安定な研究環境となっている。日本学術会議はこの問題も合わせて強く政府に働きかけていく必要があるだろう。一方、科学研究費助成事業を担う文部科学省や日本学術振興会等においては、このような歪んだ科学予算の現状を理解したうえで、適切に研究費が分配されるよう考慮すべきである。

気象学における具体的な大型研究計画については、数値モデル研究に必要な「大型計算機」、グローバルに大気状態を捉える「衛星観測」、衛星と相補的な観測の一つとして位置づけられる「航空機観測」は独立した項目で議論されている。ここでは、わが国が世界トップレベルの技術力を誇る大型大気レーダーと南極観測について議論する。

大型大気レーダーは、1980年代に「MU レーダー」が滋賀県信楽町で稼働を開始して以来、その高い時間

および高度分解能を生かすとともに、大型大気レーダーでのみ直接観測可能な鉛直風の解析により、大気重力波や対流等の小規模現象と大規模循環等との関連研究が行われてきた。「赤道レーダー」は2001年に実現し、対流圏や電離圏の研究に積極的に利用されており、イメージング観測を通して対流圏界面付近のシア不安定の微細構造の解明もなされている。南極においては、過酷な環境や輸送・電力等の制限から数々の技術的革新が必要であったが、IUGGやSPARC、SCOSTEPなどの国際学術組織のサポートを得て、「PANSYレーダー」が予算化され、実現した。2012年より南極対流圏・成層圏の定常観測が開始されている。また、近い将来、中間圏や電離圏に観測領域が拡大される予定である。PANSYレーダーが大型大気レーダー網に加わることによって、地球規模での大気重力波の実態が明確化され、また、極域固有の雲（極成層圏雲・極中間圏雲）、宇宙から降込む高エネルギー粒子の中性大気への影響等の解明が進展しつつある。

PANSYレーダーの建設および観測は日本南極地域観測隊の活動の一環として行われている。南極観測は地球環境のモニタリングという意味できわめて重要である。一つには、人間活動域から離れているため、地球全体の変化が平均化されて見えること、つまり、S/NのN（ノイズ）が小さいことが挙げられる。もう一つは、人間活動に端を発するオゾン層破壊が、オゾンホールで顕著に現れることである。これは、S/NのS（シグナル）が大きいということである。1885年に初めてその存在が確認された極中間圏雲もオゾンホールと同様、人間活動によって地球上に出現したと考えられるSの大きな大気現象である。このような地球環境のモニタリングにおいて重要なことは、途切れることなく継続的にデータを取得することである。南極への輸送は年々変動する海水状況に大きく左右される。加えて、最近では、ヘリコプターなどの輸送手段において、自然環境に起因するものとは異なる不安定要素が大きいのかかるようになった。すなわち、これまでは当たり前のように継続されてきた南極観測も、安定した構造を失いつつある。気象学会としては、南極における継続観測の重要性を、政府や社会に対して積極的に発信していく必要がある。

4.5 衛星観測の推進

人工衛星等の宇宙飛翔体に搭載したりリモートセンサーによる地球表層（陸面、海面、大気）の観測は、

全球観測、同一センサーによる観測、情報の多様性（スペクトル情報の利用）、時間的継続性といった観点から、地上観測や航空機観測では避けられない空間・時間・観測項目の空白を埋めるという大きな意義を有している。また、これらの多様な情報は気象学のみならず、地球科学、環境学といった学際科学においても有効活用が図られている。

一例を挙げれば、地球温暖化に起因する気候変動の将来予測の精緻化において重要な役割を果たす、地球システムにおける炭素循環の理解とモデルの高度化が強く望まれている。これは、人為的に排出される二酸化炭素などの温室効果ガスの大気中に残存する量を予測する上で必須のものであり、特に陸域生態系や海洋における吸収や排出量の実態把握が必要とされている。このため、地上での現場観測に加えて、人工衛星からの地表面状態（陸面被覆、森林減少域、海洋表面）の観測に基づくボトムアップ計算や、大気中濃度の空間・時間変化の観測に基づくトップダウン計算などがなされ、これらの統合化に基づき、より正確な吸収・排出の実態把握や気候変動に伴う吸収・排出の変化が明らかにされようとしている。

1990年代が始まる前後から、当時の宇宙開発事業団（NASDA）を求心力として、非常に多くの研究者を巻き込んだ形（「600人委員会」とも呼ばれた）で、将来の地球観測衛星（あるいは衛星に搭載されたセンサー：以下、同様）に関する地球科学的な観点からの議論を精力的に行った経緯がある。その成果は、ADEOS、TRMM/PR、ADEOS-2、Aqua/AMSR-E、ALOS、ISS/SMILESへと開花した。中には短命に終わったものもあるものの、長期継続観測を意図したADEOS、TRMM/PR、AMSR-Eなどはその嚆矢となり、気象学やその周辺（学際科学）に大きく貢献してきた。一方、気象庁の「ひまわり」シリーズに見られるような現業目的の衛星観測が営々と続けられており、日々の実況監視や天気予報精度の向上に大きく寄与している。

近年は、より「利用ニーズ主導」が謳われるようになり、個々の研究者の要求というより、社会的要求、行政的要求、科学的要求の観点に重点が置かれるようになってきていること、またデータの複合利用が進んでいることは、新しい地球観測衛星の提案をしていく上で留意すべき点と言えよう。

現在、運用中のわが国の地球観測衛星として「ひまわり」と「いぶき（GOSAT）」があり、TRMM/PR

についても継続運用がなされている、また、「しずく (GCOM-W1)」が2012年5月に打ち上げられ、8月に運用を開始した。2013年末の時点で具体化が進んでいる地球観測衛星計画として、ALOS-2, GPM/DPR, EarthCARE/CPR, GCOM-C1, 広域・高分解能観測技術衛星, ひまわり8号および9号, GOSAT-2などがあり、提案段階のものとしてはISS搭載の機器候補として、植生ライダ―MOLIや大気汚染観測センサーAPOLLOの検討が進められている。

衛星による地球観測については対象とする範囲を、必要とする学問分野と時間・空間の広がりおよび分解能の観点から検討を進める必要がある。近年は地球全体をカバーすることだけでは不十分で、より空間的(高度方向含む)にも時間的にも細かく見ていくことが、特にプロセス研究では重要になってきている。また、現業的にはリアルタイム性への要求も大きい。さらに、大規模災害や越境大気汚染などの把握においては、地球観測衛星と航空機などとの相補的な観測体制の構築を視野に入れた計画作りが必要である。

現在、宇宙航空研究開発機構(JAXA)では地球圏総合診断委員会を設置し、気象学会会員を含め、将来の衛星観測を担うと期待される研究者らの参加を得て、10年以上を見通した地球観測衛星の長期展望を見出そうとしている。目的として「宇宙からの地球観測により地球圏を総合的に診断し、気候変動問題等に対応する課題解決に資する将来の地球観測ミッションを検討すること」を掲げている。こうした活動は重要なものであり、その進展とともに情報公開に期待するところである。惑星気象学などの分野においても、衛星観測は強力なツールとなり得ることから、わが国における惑星探査衛星の実現に向けたさらなる研究開発の展開が望まれる。

ところで、最近の若手研究者の多くは、観測データは誰かがどこかで作るものであって、自分たち自身が新しい観測データの提供者になろうという意識が薄いのでなからうか。あるいは、良質のデータが提供され自由に取得できるようになってきた結果、インターネットでダウンロードして研究に使うという、完全な利用者の立場に慣れ切ってしまっていないだろうか。

地球科学や環境科学の研究には長期にわたる観測データが不可欠であり、衛星による地球観測が継続的になされる必要がある。地球観測衛星の開発からデータ利用に至るまでには数年から10年の長い年月を要す

ること、サイエンスとエンジニアリングとの両輪がうまく連携して回ることが必須であることから、民間におけるセンサー開発技術が維持・発展されなければならない。また、極軌道衛星搭載の地球観測センサーと静止気象衛星センサーの類似性や相補性に鑑み、これらの研究開発やデータ利用に関し戦略的かつ総合的に推進していくことが重要となろう。同時に、若い世代の研究者に対しては、データ利用だけではなく、センサー機器に関する十分な知識と提案能力を有し、衛星プロジェクトを牽引する能力を持った人材を育成していくことが必要である。若い世代の方々に、さらに高度化された宇宙からの新しい地球観測にチャレンジすることを期待したい。

一方、地球規模の観測が可能な地球観測衛星データの利用においては、大気、陸域、海洋のいずれを対象とするにしてもデータ同化を始めとしたさまざまなモデルの開発・利用との協働作業が大変重要になってきている。今後の衛星計画の立案・観測データの利用に際して、モデル研究者の参画が不可欠と言えよう。

最近の宇宙開発戦略本部(2008年に、内閣に設置)における議論の動向は、その是非について議論の余地があるとはいえ、宇宙産業育成や行政課題への対応可能性に重点が置かれているように見える。計画の立案から実現に向けては、関係府省・行政担当者との連携をより一層進めることが大事であろう。同時に、研究者コミュニティとしてはそれらへの配慮をしつつも、人工衛星を利用した地球観測における新しい科学的知見の発見・充実を目指した、科学者の立場からの主張は当然行っていくべきものである。そういう意味では、個々の計画にとどまらず、宇宙開発戦略そのものについても、気象学会が気象研究者コミュニティとしての要望を発信していくことが重要な意味を持つこととなる。

4.6 航空機観測体制の構築

地球温暖化を含む地球環境変動が急速に進行しつつある現在、この地球環境変動に関わる正確な大気科学データの取得と、それに基づく現象解明、将来予測が必要である。地球規模での観測では人工衛星が主要な役割を果たしているが、先端的な計測器を用いた航空機による直接観測は、測定項目、精度、時空間分解能の点で優れている。鍵となる大気物理・化学過程や現象の詳細の解明などにおいて人工衛星と相補的な役割を果たしている。航空機からの地球観測は、地球観測サミットを通じて策定された全地球観測システム

(GEOSS)においても、人工衛星観測や地上観測ネットワークとの相補性からその重要性が謳われている。

国際的には、アメリカ (NASA や NOAA など) やヨーロッパの主要国 (ドイツ, フランス, イギリス など) の大きな研究組織が観測専用機を保有し、航空機観測システムを構築・運用し、大きな成果をあげてきている。さらに重要な点はダイナミックで斬新な大気科学研究を継続的に構想し実施していることである。結果として、大気科学研究の分野を世界的にリードし、大きな研究の骨組を作ってきたといえる。

日本国内では大学や国の研究機関 (気象研究所, 国立環境研究所, 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) など) が、散発的に競争的資金などにより観測を実施してきている。それぞれのプロジェクトとしては成果があがっているものの、アジアの系統的かつ継続的な観測データは得られていない。

より具体的にはアジアの人為起源物質 (エアロゾルや温室効果気体など) の地球規模での拡散や、その大気環境や気候に与える影響 (気温や放射・雲・降水過程など) について、実態の把握と現象の解明が急務となっている。また気象・気候モデルにおいては空間解像度の粗さによる雲物理過程の表現に関する不確定がある。これらの不確定性を低減するためには詳細な雲物理過程の観測が不可欠である。静止気象衛星や CloudSat/CALIPSO などの衛星リモートセンシングによる全地球的な観測がモデルの雲検証に大きな役割を果たしてきた。しかし、実際に雲の3次元的な特性の詳細については、リモートセンシングでは不十分であり、雲の存在する場所での直接計測の必要がある。航空機観測では、雲の微物理・放射過程・雲力学に関する重要なパラメータの高精度な直接測定が可能である。

現在、学術委員会の下に、「航空機の科学利用推進検討会」が設置され、航空機の科学利用に関する報告書の作成を行っている。この報告書を学術委員会に提出するとともに、関連研究者、学会、文部科学省など関係機関にはたらきかけを始める必要がある。

4.7 大規模数値シミュレーション

数値シミュレーションは、理論、観測等と並んで気象学に欠くことのできない研究手段であり、基礎的な理論計算から気象予報、気候予測といった応用まで、シミュレーションを必要とする課題は多岐にわたる。コンピュータの大型化と研究課題の高度化に伴い、近年、シミュレーションの大規模化が著しい。

大型コンピュータの黎明期より、気象学は主要な利用分野として恩恵を受けてきた。1980年代に日本が開発に参入したベクトル型計算機は気象学分野にも盛んに導入された。1990年代に入ると、さらなる計算の大規模化に向けて並列計算機の利用が進んだ。こうした中で、2002年に開発された日本のベクトル型並列計算機「地球シミュレータ」は2年半にわたって世界最高速の性能を誇り、その恩恵により日本は高解像度の気候シミュレーションで世界に先んじた。2011年に世界最高速を記録したスカラー型並列計算機「京」においても、気象学は主要な利用分野 (防災・減災に資する地球変動予測) の一部であり、高解像度の気象、気候モデル研究の展開が始まっている。

今後も世界最高速やそれに準ずる規模の計算機を利用する機会を積極的に求めつつ、そのような計算機を利用することで初めて可能になる先端的な科学の方向性を見極めていく必要があろう。気候研究では、高解像度化の他に、地球システムモデルの複雑な生物化学過程の結合、多数アンサンブル実験による不確実性評価などが視野に入る。また、雲解像大気モデルや渦解像海洋モデルによるスケール間相互作用の研究、湿潤LESによるプロセス研究なども重要なテーマである。気象予測分野では、雲解像モデルによるデータ同化と予測実験などの可能性があるだろう。

一方で、ベクトル化、並列化といったアーキテクチャの複雑化により、気象学の計算においても特殊なプログラミング技術への対応が求められてきた。今後のさらなる大規模計算においてはプロセッサの種類によらず数千、数万やそれ以上のノード数での超並列計算が必至であり、ノード間データ転送やCPU-メモリ間データ転送を意識すること等の高度なプログラミングが必要となる。このようなプログラミングにある程度対応できる人材を気象学の内部で育成することと同時に、計算科学の専門家や他分野のシミュレーション研究者との協力も重要となるだろう。

また、数値気象・気候モデルは、これまで国内外の多くのグループにより独立に開発が行われてきた。この状況は、グループ間の競争を促すとともに、モデルの多様性を産み、複数のモデル (マルチモデルアンサンブル) を用いた予測の不確実性評価を可能にしてきた。しかし、前述したような計算機資源の拡大への対応や数値モデルの高度化に伴い、各グループにおけるモデル開発・維持の負担が増大している。今後は、効率化の向上のため、複数のグループ間で共有可能なモ

デルコンポーネントを共同で開発・維持し、コーディング規約やコンポーネント間のインターフェースを共有化する戦略が有効になり得る。このような取り組みには、モデル結果の相互比較を容易にし、モデル開発の透明性を向上させる意義も期待できる。現在、国内のグループ間で初期的な取り組みが開始されているが、これを成功に導くためには長期にわたる求心力の維持と国際戦略が鍵となるだろう。

さらに、限られた予算や消費電力の制約の下で計算機のさらなる大型化を図るにはアーキテクチャ上のブレークスルーが必要と考えられる。その上、気象シミュレーションにおいて特に顕著な、データ量の「爆発」の問題は、今後ますます深刻化するものと思われる。気象学のニーズに即した、計算そのものの入り口からデータ解析の出口までのトータルな処理能力が高い計算機システムを設計するためには、気象学と計算機科学の専門家の連携が不可欠だろう。一方で、大型計算機の調達可能性は国の科学技術政策のほか、財政や産業政策にも左右されるため、世界最高レベルの大型計算機開発に依存しすぎない研究戦略を持つおくことも重要であろう。

4.8 気象・気候データ

気象観測に関しては、過去20年間に大きな進歩が見られた。集中豪雨のようなシビア現象の監視については、気象レーダーのドップラー化やウィンドプロファイラー全国展開が行われ、大気環境のモニタリングに関しても、東アジア全域のライダーネットワーク観測や地上ベースの各種機器による国内ネットワーク観測と共に各種インベントリーの整備も進んだ。また、こうした観測データと数値モデル結果を統合し、現象の再現と予測精度を向上させるデータ同化手法も画期的な進歩を遂げた。

数値モデルおよびデータ同化技術の進展に伴い、過去の気象場を再現する再解析データも整備が進んでいる。ECMWFやNCEPによる再解析データと共に気象庁25年再解析データ(JRA-25)も多くの研究者に利用されており、さらに1958年まで55年さかのぼった水平60 km解像度のJRA-55再解析データも作成した。

気候データについては、歴史的な観測資料の発掘整理、氷床コア、海底コア、年輪などさまざまな過去の気候データのアーカイブが各研究機関、研究者ベースで進められ、多くのデータベースが整備されてきた。

このように、気象・気候データは、過去から現在に

至る膨大なデータが蓄積されつつあるが、一方では、こうした膨大な地球観測データへのアクセスを可能とするDIAS(データ総合・解析システム)などの活動も、総合科学技術会議による「地球観測の推進戦略」に基づくGEOSS計画の一環として進められつつある。また、2008年には、全球解析、メソ解析等のモデルデータを気象研究の発展のために利用する気象研究コンソーシアム制度が発足し、気象庁データの研究への利活用の道が整備された。

しかし、こうした観測データアーカイブの進展やデータのアクセシビリティを高める取り組みが大きく進展した一方で、依然としていくつかの問題が残されている。数値モデルの出力データの利用に関して、米国の予報機関(NCEP)では無償公開が進みつつあるが、わが国では政府系機関の観測データや気象庁の数値予報モデルの出力データ(GPVなど)を、研究目的で準リアルタイムで利用することは、再配布ができない、産学連携に使いにくいなどの制限がある。気象学の発展や応用分野育成の観点からも、現状の改善が望まれる。

研究機関や研究者が整備したデータベースの利用についても、公的機関や団体による気象学・気候学のデータのアーカイブの仕組みがほとんどない。また、こうした複数システムのシステム(System of systems)を単独の機関や研究者個人が整備することを評価する仕組みもない。その結果として、合理的なデータアーカイブのシステムは未成熟で、わが国の気象学・気候学の発展の障害となっている。

さらに、現在では気温や風速など測定法や精度に関するスタンダードが確立したデータに加え、さまざまな測定技術を活用した放射や乱流などの大気物理要素、黄砂やエアロゾルなどの大気環境要素、硫酸酸化物、窒素酸化物などの大気化学成分についての多種多様なデータが大量に利用可能となりつつある。しかし、それらの観測要素に関しては、測定法や精度維持に関するスタンダードが整備されていない場合が多い。こうした品質管理に係わる仕事は、データの高度利用を図る上で極めて重要ではある。しかし、個々の研究者では支えきれない部分であり、学会においても状況の改善に向けた支援や取り組みが必要である。

5. 教育と人材育成

5.1 はじめに

この章では、気象学・大気科学に関する教育と人材

育成、社会啓発の諸問題について議論する。教育に関しては、初等・中等教育（5.2節）での地学の履修率は著しく低下している。これは、大学・大学院教育の内容やあり方に大きく影響しており（5.3節）、同分野に進む大学生、大学院生の数の減少にもつながっている。教育の問題は大学院重点化に伴うポストドク・若手研究者就職問題（5.4節）も相まって、本分野の将来を担う研究者の人材育成に影を落としている。気象学会における男女共同参画問題は時代の流れとともに改善に向かっている面もあるが、国際的には依然立ち後れており、今後も注意深く監視していく必要がある（5.5節）。一方、これらさまざまなフェーズにおける教育の問題は、一般社会における気象学・大気科学リテラシーの低下にもつながっている。これらを補うための啓発活動については、気象学会では社会とコミュニケーション（5.6節）の視点から、気象予報士会（5.7節）との連携もとりつつ、草の根的な活動がなされている。しかしながら、持続的社會に向けて解決すべき現代の最重要課題の一つが、地球規模での環境問題であることを鑑みても、気象学・大気科学を含む地球科学教育と若手研究者の就職も含む人材育成に対して、抜本的な改革が必要であることは言を俟たない。

以下、個々の問題を議論していくが、気象学会単独で解決できないものも多く、関連する他学協会との連携も視野に入れた活動が必要である。今後の気象学会の活動方針の一助となれば幸いである。

5.2 初等・中等教育

2002年に実施された文部科学省の学習指導要領の改訂に伴い、初等・中等教育（小学校から高等学校まで）における気象学の分野が大幅に削減された。背景には「ゆとり教育」の名の下に学習内容を全教科一律に3割削減したこと、総合的な学習の時間を創設したこと、選択教科の時間数を大幅に増やしたことが挙げられる。小学校教育の気象内容では、雲・降水に関する内容が中学校に移行され、中学校教育では「日本の天気」の中項目が全面的に削除され、全体でも約4割も削減された。初等・中等教育の教科書は学習指導要領に従い執筆されるため、大項目に限らず小項目の細部の学術用語のひとつひとつに至るまでチェックされ、これに即していないと文部科学省検定に合格しないため、細心の注意が払われることになる。したがって、教科書の執筆者が是非とも盛り込みたいと意気込んで執筆した内容が、学習指導要領に従っているかをチェックする検定員により厳しく校閲され、ことごと

く削除されるという事例も多々発生する。教科書の気象学に関する部分の執筆は気象学会でも著名な大学教授陣が担当するが、その教科書を検定するのも、匿名ではあるが気象学会で著名な大学教授陣であり、気象教育に果たす気象学者および気象学会の責任は極めて大きい。

教科書が文部科学省の検定に合格すると、学校で実際に教鞭をとる教師のために、より詳細に学習内容を補強した教科書指導書という解説書が教科書とは別に編集・出版される。この教科書指導書には、執筆者の考える重要事項を検定にとらわれることなくふんだんに盛り込むことができるので、ここに教科書の個性が現れると言っても過言ではない。このようにして編集された教科書指導書が全国の約100万人とも言われる教師へ配布される。2009年の学習指導要領の改訂では、それまでのI、IIを付した高等学校の地学教科書の科目名が、それぞれ「地学基礎」と「地学」へと改名された。地学基礎では中学校と高等学校との接続を考慮しながら、より基本的な内容で観察・実験、探求活動などを行い、基本的な概念や探求方法を学習する。その際、日常生活や社会とのかかわりを重視しながら地球や地球を取り巻く環境への関心を高めるとともに、地学の基本的な概念や原理・法則を理解させ、科学的な見方や考え方を養うことが盛り込まれた。そのため、中学校理科第2分野との関連を考慮して、地球の自然環境と人間生活のかかわりについて考察させる項目として、「変動する地球」の大項目の下に「地球の環境」という小項目が設けられたのが特徴である。気象学と関係する小項目「大気と海洋」では、地球の熱収支（大気の構造と地球全体の熱収支について理解すること）、および、大気と海水の運動（大気の大循環と海水の運動およびそれらによる地球規模の熱の輸送について理解すること）が設けられている。

「地学」は、「地学基礎」のように基礎を付した科目の内容を基礎に、より発展的な概念や探求方法を学習する科目として設けられている。これは、地球の概観、地球の活動と歴史、地球の大気と海洋、宇宙などで構成される。ここでは、自然を探求する能力や態度を育て、創造的な思考力を高める観点から、新たな科目として「課題研究」が設けられている。気象学と関係する大項目は「地球の大気と海洋」であり、地球の大気と海洋の事物・現象を観察、実験などを通して探求し、大気と海洋の構造や運動を理解させることが目的とされた。小項目には「大気の構造と運動」と「海

洋と海水の運動」の2項目があり、大気の構造と運動には、大気の組成と構造の理解、大循環と対流による現象、および日本や世界の気象の特徴を理解することなどが指針に盛り込まれている。「地学」で気象が扱われる一方で、「地理」では気候が扱われ、そこで地球環境問題が詳しく説明されるという区別がある。

気象学は物理学を基礎とするが、高等学校における地学の授業は物理学の授業と同時並行的に行われるため、大気現象の理解の基本となるような角運動量保存などの物理概念の使用が禁止されている。このために教科書はかえってわかりにくい記述となっている部分も少なくない。同様の問題は、地学に含まれる分野のあちこちに生じており、科学としての面白さがダイレクトに伝えられない状況となっている。結果として地学は暗記科目ととらえられ、地学は実質的に文系科目に位置づけられており、理系の生徒の地学選択率は極めて低い。

近年の初等・中等教育における生徒の理科離れは、自然科学の発展にとって深刻な問題であるが、その背後にあるのは教師の理科離れであり、教える側の科学一般の理解力の欠如が結果的に生徒の理科離れの原因になっていると考えられる。特に地学を専門とする教師数の減少は悲惨極まりなく、改善の方向性すら見出せていない。この事実は、大学受験に学校教育の重点を置いた日本全体の科学離れに端を発している。資源の少ない科学立国としての日本では、世界をリードする科学技術の発展とそれを支える科学教育の充実が本質的に重要であることは自明だが、そのことへの理解が十分とは言えないのが残念である。

大学に合格し、卒業論文に進むための専門分野を物理、化学、生物、地学の枠の中から選択する段階になると、地球科学、特に地球環境学を選択する学生が他科目よりも多くいるという現実、日本の初等・中等教育が、大学受験に翻弄されているという教育のひずみを浮き彫りにし、現行の大学入試のあり方に疑問を呈する材料となっている。地学教育は、地球環境問題や防災の問題を国民に正しく理解してもらうためのリテラシーとして必要である。気象学会は気象研究の発展に寄与することが本務であるが、その科学的基盤となる気象教育においても、現行の気象教育制度に疑問を呈し、積極的に改善に向けた提言を行っていく姿勢が求められる。

5.3 大学・大学院教育

中等教育において、地学の選択者がきわめて低い現

状を鑑みると、大学における地学教育は極めてプリミティブなところから始めなければならない。つまりほとんど白紙の状態から教育することになる。気象学においては物理や数学、化学の基礎知識を前提にできるものの、たとえば、北半球中緯度の低気圧の周りで反時計回りに風が吹く事実さえ知らない学生も数多い。現在、大学の教養課程においては、物理や化学、生物と比べて地学のカリキュラムが十分練られたものになっておらず、担当教員の専門分野に偏る傾向がある。

日本学術会議では、文部科学省高等教育局からの依頼で大学教育の分野別質保証の在り方が検討されているが、第22期（2011年10月～2013年9月）においてはこれを受けて大学教育における各分野の参照基準（カリキュラム）の作成が行われることとなった。この参照基準は、「『学士力』が求める普遍性と各分野に固有の特性との双方を踏まえつつ、専門分野の教育という側面から一定の基準となるものを提示する枠組みを構築し、実際に個々の分野において基準を提示すること」になる。これを受けて、地球惑星科学委員会においては、地学の参照基準を議論・作成するための地球惑星科学大学問題分科会が立ち上げられた。この参照基準は、分野を明確化することで、大学において地球惑星科学を専攻する学生の基本的な知識や能力を担保するものであり、分野を明確化することになるため、地球惑星科学を専攻しない学生や一般社会に対しての啓発という視点からも重要な動きととらえられる。

大学院教育においては修士課程と博士課程の教育を分けて考える必要がある。学部において地球物理学を専門としなかった学生も多く大学院修士課程に進学してくる。したがって、このような学生については、大学院から気象学の基礎を教育することになる。そして、その少なからぬ割合が修士で卒業し、気象学に関係しない企業に就職する。就職活動期間を考えると、実質的に修士論文の研究にかかる時間は半年もないことすらある。このような学生の教育をいかに位置づけるかが問題となっている。

博士課程は将来の同分野の発展を担う人材を育成するという視点からきわめて重要な教育課程である。社会のグローバル化が進む中、学術分野における国際化は今後益々重要となる。気象学の高いレベルでの基礎学力はもちろんのこと、博士課程においては、英語能力、国際的に通じる論理構成力・表現力などの鍛錬に加え、異文化の理解や協調といった国際的素養の取得

が必要である。以前と比べると、文部科学省主導のGCOE等プログラムや日本学術振興会の特別研究員DC制度など経済的なサポートの充実により、このような国際力を涵養する環境が整ってきている。しかし一方で、このような競争的資金に頼る教育制度では、大学教員側の負担も大きく、公平さも必ずしも担保されていない側面があり、課題は少なくない。

博士課程への進学率は減少傾向にある。進学率の低下の背景には、大学院重点化とポストドク1万人計画の推進の結果、受け入れる社会体制が十分整わないままにポストドク人口が増加し、40歳に近づいても定職に就けない若手研究者が増えた現実がある。また、競争的資金獲得やさまざまな評価に対応するため大学教員の研究時間が大幅に減り、残業時間が増えて、若者にとって研究者は必ずしも魅力的な職業とは映らなくなっていることも考えられる。博士進学率を適切に維持するためには、研究者のキャリアパスをある程度明確化し、その将来に魅力を感じられるような仕組みを考え、制度を整える必要がある。たとえば、気象庁などの省庁における博士学位取得者の採用促進、気象学が生かせる民間企業での職種の開拓などが考えられる。大学においては、約15年前に行われた大学院重点化に伴い、ポストのアップシフトにより助教等の若手ポストが大幅に減少し、将来大学を支える若手研究者の成長の場が限られたものとなってしまった。助教は研究だけでなく将来の教育者の育成という意味でも重要なポストである。コミュニティ全体の中でこのような状況を認識し、トップダウン、ボトムアップの両面から状況を打破する必要がある。これは次節のポストドク問題とも大きく関連する。

5.4 若手研究者就職問題

大学院重点化などにより、日本の気象学・大気科学関係の若手研究者の数が大幅に増加した。一方、定数削減政策により、大学・研究所の終身雇用のポストの数はこの10年間で減少する傾向にあり、その結果として、安定的な研究ポストに就職できる若手研究者の数が減少している。代わりにプロジェクト等の短期的な任期雇用が増加しているものの、総合的に見ればポストドク・若手研究者の置かれている状況は不安定であるといわざるを得ず、気象学・大気科学に携わる研究者の育成に悪影響を及ぼしかねない状況である（いわゆるポストドク問題）。ポストドク・若手研究者の就職問題は、現代日本の大きな問題の一つである若年層の雇用問題や世代間格差の問題の一部であると考えることが

できる。その解決には大きな困難が伴うことが予想されるが、この問題を放置するとますます状況は悪化する一方である。ポストドク・若手研究者の待遇を一刻も早く改善し、彼らが長期的視野を持って研究に専念できる十全な研究環境を準備する真摯な取り組みが必要とされている。

ポストドク・若手研究者の数が増加したことにより、多様な研究活動が可能になった反面、以下のような深刻な弊害が顕在化している。第一に、プロジェクトの短期的任期雇用が増加していることにより、度重なる就職活動を余儀なくされるなどポストドク・若手研究者の雇用状況が不安定化している。また、短期的な成果が求められる任期雇用の増加により、長期的な視野を持って自らの研究を発展させる仕組みが脆弱化していることが危惧される。さらに、昨今の厳しい国家予算状況に鑑みて、プロジェクトの任期雇用が将来にわたって確保できるか不安が広がっている。このような状況を見て、研究者としての道をあきらめ民間に就職しようとしても、日本国内では博士号取得者の就職先はそれほど多くないという問題がある（昨今の不景気でさらに状況は深刻化している）。最後に、ポストドク・若手問題の深刻な状況を見て、大学生が博士課程への進学を回避するため、新たな人材の確保が難しくなりつつある傾向が認められる。このように、気象学・大気科学を発展させるための学術的基盤、および人材確保・育成の基盤がともに危機的状況にある。

ポストドク・若手研究者の就職問題の根源は、国策として実施された大学院重点化に求めることができる。特に、重点化の際に、ポストドクの受け入れ先の確保についての認識が、政府をはじめとする関係者に十分でなかったために、キャリアを積んでもなおポストドクを続けざるを得ない不本意な状況にある研究者が多数発生することとなった。したがって、大学院重点化を進めた政府は責任を持ってこの問題の解決を図らねばならない。また、気象学会、特にそこに大きな位置を占める大学関係者は、この問題が大学院重点化による弊害であることを認識し、政府・行政機関にこの問題の解決を積極的に訴えていく必要がある。

また、ポストドク問題が深刻化している原因の一つとして、大学院重点化に対する社会の理解が十分に得られず、民間就職先などが増加していないことも挙げられる。気象学会としても、ポストドク問題を含む大学院や研究環境のあり方について社会への発信を積極的に行い、民間会社等との連携を深める等、世間一般の理

解を得るための努力が必要となる。

大変残念ながら、問題の深刻さにかかわらず、問題解決に向けた気象学会の今までの取り組みは、政府への働きかけや社会への発信という面も含め不十分であったといわざるを得ない。今後は問題の重要性に鑑み、学会を挙げての取り組みが必要である。特に、ポスト等を雇用する側には、人の雇用に関する社会的責任を十分意識することが重要となる。さらに、ポスト問題の深刻さに対する認識が「甘い」傾向が散見されることも、問題解決を促す行動が鈍い一因かもしれない。例えば、ポスト問題の構造は、過去のいわゆるオーバードクター（OD）問題と類似する部分があるため、「いずれ解決する」という見方もあるが、その認識は改める必要がある。OD問題は、当時の好調な日本経済を背景として大学教員のポストが増加されることにより解決した。しかしながら、本格的な人口減・高齢社会の到来により、同様な解決策がもたらされる可能性は低いであろうことを確認する必要がある。

今後、少しでも状況を改善し、若手研究者が安心して長期的に研究業界で活躍できる環境を構築するために、気象学会は積極的な活動を長期にわたり行っていく必要がある。まず、教員のようなテニュアの安定的な研究ポストの増加を求めそれを実現していくための努力を惜しむべきではない。教員以外では、例えば気象・大気科学系の観測・解析やデータ整備を専門とした技官的ポストのテニュア職の増加も期待したい。それでもすべてのポスト・若手研究者を雇用できる状況ではないことが予想されるため、その対処策として、気象業界でのソフトマネーの循環を活性化し、常時更新可能な任期付き雇用を多数確保することも考えられる（ただし、後に触れる労働契約法改正により、この実現は現時点ではかなり難しい）。また、短期的成果を求められ自分の研究者としてのキャリア形成をする余裕がない現状を改善し、ポスト人事制度にその余裕を系統的に組み入れることを義務付けるような改革も必要である。さらに、給与・昇給・福利厚生面などの待遇においてテニュア系のポストの方が恵まれている現状を改善し、キャリアを積んだポストであれば任期付き雇用においても同程度の待遇を得られるような人事制度の改革も必要であろう。加えて、社会へ多種多様な人材を輩出することも気象学会の重要な役割であることに鑑み、博士号取得者の民間会社・官公庁・国際機関への就職先の確保・開拓にも努力

すべきであろう。

2013年4月より、労働契約法改正案が施行され、有期雇用契約が5年を超えて反復更新された場合は、労働者側に無期雇用契約の権利が生じることとなった。本来この法改正の目的は、有期雇用契約者を保護することにあつた。しかしながら実際には、この法改正により、有期雇用の多い若手研究者・ポストの待遇がさらに悪化することが懸念された。すなわち、無期雇用契約のための資金が充当できない部局では、若手研究者やポストを5年以下の任期で雇い止めする例が増えることが想定される。例えば、今までは5年の任期かつ1回の再任可という条件で研究者を雇用していた部局でも、この法改正により、無期雇用に転換せず（またはできず）、1回の5年任期で雇用を終了することとなる。2013年5月の時点で判明している限り、この法改正による各大学・研究所の対応は、若手研究者・ポストに対し厳しいものとなっている事例が大半であった。その後、労働契約法には特例が設けられ、大学の教員等は、通算契約期間が10年を超えないと無期契約に転換しないことになった。次節で指摘するように、この法改正は若手女性研究者にとってさらに深刻な問題を含む。学会としてはこの現状を踏まえ、法改正のデメリットをアピールし、実効ある対応策が取られるよう行動する必要がある。

ポスト・若手研究者の就職問題は社会全体の問題であり、気象学会単独、また各大学・研究機関の個別の努力で容易に解決しうるものではない。気象学会は問題解決のため、他学協会との連携を積極的に行う必要がある。また、気象分野がある大学・研究機関で連携して常時若手を支えるシステムの設立も重要であると考えられ、気象学会はその設立を支援することで役割を果たすことができるであろう。

他の学協会においては、例えば日本惑星科学連合や日本物理学会のように、若手のキャリアパスを支援するための内部組織を設置しているところもある。気象学会が第37期（2013年～）に設置した「人材育成・男女共同参画委員会の活動に対する支援を、学会全体で強化する必要がある。

5.5 男女共同参画

気象・大気科学分野において、男女共同参画は、道義的側面からも人材確保の側面からも重要なテーマである。一般的に、理工学分野は人文社会分野と比べ研究実績の評価基準が明確であるため、女性研究者への「差別」は少ないと思われてきたが、必ずしもそうと

は言えない。テーマや手法の選択において、女性に合う、合わないといった主観的な基準が少なからず女性研究者の専門に影響してきたことは否定できない。日本においては大学入学時から理系女子の割合が低い。これは国際的にみると日本固有の問題であるが、不自然であるとの社会的認識が低い。理系女子の割合が低いのは、家庭教育、初等・中等教育、または教育の質の平等性など、根の深い問題である可能性がある。結果として日本における女性研究者の割合も低くなる。たとえば、2009年度の研究者に占める女性割合は13.0%であり、これは比較できる36か国中最下位である(*1)。託児所やトイレの数など研究環境におけるインフラ整備はかなり改善してきているが、女性の割合が低いことについて検討が及ばない部分が残っている。

もともと数の少ない女子学生が博士号を取得した後もさまざまな問題が待ち受けている。雇用における差別の問題も報告されており、文部科学省の調査によると、ポストドクター等の平均月給は、税込みで男性は約314,000円、女性は約282,000円(全体では約306,000円)であり明らかに差がある(*2)。また、結婚・出産・育児・介護に対するサポートの弱さの問題も(一般社会と同様)存在している。5.4節でも指摘したように、ポストドク・若手研究者の雇用状況が厳しいため、結婚しても別居を余儀なくされ、出産を控えるケースもある。また、ポストドク時代と出産・子育て時代が重なることにより、不安定な雇用が人生に大きく影響する度合いが女性の方が深刻となる傾向もある。任期雇用の場合、その任期の初年度、最終年度は育児休暇が取れない仕組みになっている研究機関もあり、実際に出産が任期の最終年度にかかり更新手続きができなかった例も存在する。また、女性研究者の配偶者は研究者である傾向がある(*3)が、男性が育児・介護休暇を取得する例は少ない。特に、夫婦双方が任期雇用の場合はその傾向が強く、女性側の負担がさらに増す傾向にある。これらの要因が重なって、いわゆる女性就業率の「M字カーブ問題(子育て期の30代女性の就業率が低い問題)」に近い問題が研究者業界にも存在する。そして、M字の二番目の山は終身雇用の割合が極端に低い問題がある(「きりん型」カーブ:若年層の有業率の傾斜が大きく中高年層のそれが平坦である分布(*4))。2006年度より、出産・育児による研究中断後に円滑に研究現場に復帰できるように支援する「特別研究員-RPD」事業が創設されたが、これはもともと過渡的なシステムとして設計されたも

のであり、出産・育児による中断がない環境が望ましいと考えられている。そのためにも、男性研究者も育児しやすい環境の整備と、配偶者および雇用主双方の意識改革が重要である。

女性研究者の場合、抱えている問題や研究環境が個人により大きく違っている傾向が認められる。例えば、既婚か未婚か、別居か同居か、出産希望か否か、子供の有無、任期雇用で満足か否か、職場環境(特に上司の理解)の違いなど、さまざまなケースがある。しかしながら女性研究者が少ないため、ロールモデルとなる女性研究者が身近に存在せず、相談する相手が少ないという問題が存在する。女性研究者を支援する体制づくりを通じ、男性研究者と同様に女性研究者が能力を発揮できるような環境を整えるための取り組みを気象学会としても行うべきである。また、すでに管理職に就いている女性研究者に対しても、相変わらずさまざまな場面でglass ceiling(ガラスの天井)が存在することも指摘しておく。

ハラスメント問題については、女性研究者の年齢層が低かった以前は、上司や教員から、あるいは同期から受ける被害が主な問題であった。中堅、シニアの女性研究者が増えた現在では部下、または学生からのハラスメントという新しい問題も生じてきている。現在では、社会全体において、明確な人権侵害問題であると認識されて、さまざまな制度設計がなされてきており、改善されつつあるが、まだ女性研究者の割合は増加の途上にあり、今後もこの問題を監視する必要がある。

2013年4月施行の労働契約法改正案により、有期雇用契約が5年を超えて反復更新された場合は、労働者側に無期雇用契約の権利が生じることとなった。しかし、実際には有期雇用者がさらに不利な状況に追い込まれることが懸念されている(5.4節参照)。加えて、男女共同参画の観点からみてこの法改正には大きな問題が含まれている。すなわち、法改正に伴い、産前・産後・育児休暇を取得した場合、任期年数に考慮しないとした機関も少なくなく、任期が実質的に減少している。これは公平な競争条件の確保の観点からみても問題であり、少子化の加速につながる可能性がある。気象学会としても事態改善のための早急な取り組みが必須である。

気象学会は、男女共同参画の理念に基づき、女性研究者が不利な扱いを受けることのないよう活動する社会的責任を持つ。この場合大事なものは、女性研究者の

比率の向上という側面にこだわりすぎないことである。留意すべき本質は、性別によらず教員や研究者としての採用・昇進の機会が均等に与えられているか、産休・育休、介護休暇によって不利にならない雇用条件および研究環境が構築できているか、という点である。昇格などの機会や仕事・研究内容に不公平が見られる場合は、これは即刻改善すべきである。

- *1: 男女共同参画白書平成22年度版 第一部現状編
1-8-6 図 (<http://www.gender.go.jp/whitepaper/h22/zentai/pdf/H22-1-3.pdf>)
- *2: 文部科学省科学技術政策研究所 2008年10月
(<http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/mat159j/idx159j.html>)
- *3: 科学技術分野における女性研究者の能力発揮 平成13-14年度 科学技術政策提言 (<http://scfdb.tokyo.jst.go.jp/pdf/20011700/2002/200117002002rr.pdf>)
- *4: <http://www.mhlw.go.jp/houdou/2009/03/dl/h0326-1a.pdf>

他参考文献

- <http://www.chemistry.or.jp/kaimu/ronsetsu/ronsetsu011.pdf>
- <http://d.hatena.ne.jp/next49/20081108/p1>

5.6 社会とのコミュニケーション

気象や天文は古くから人間社会の関心事として社会と深いかかわりを持ってきた。気象の理解を深めるための行為として気象学が発展してきたわけであるが、学問の深化と細分化が進むことで、一般の社会人にはその先端科学の現状がどうなっているのかが見えにくくなる。研究者がタコつば的に気象学の先端を究めるのも重要なことであるが、地球温暖化問題や環境防災のように巨額の研究資金が投入され社会的責任が高まる状況下では、一般人の気象リテラシーを高めて地球環境問題や防災への国民の正しい理解を得ることが重要である。そのために気象学会は、社会人向けの気象教育を積極的に行い、社会との双方向のコミュニケーションを活性化する必要がある。気象学会が一般社団法人から公益社団法人に移行するにあたり、学術的な研究成果の社会還元とともに、学会としての目に見える社会貢献活動が真剣に問われることになる。そこで、気象学会は教育と普及委員会を中心に、気象予報士会とうまく連携することで、世の中に見える形での

気象教育の充実と普及を図っている。社会人向けの気象教育の主な活動内容として、気象夏季大学の実施、公開気象講演会の開催、気象教育懇談会の開催、気象サイエンスカフェの開催、気象出前授業などがある。以下にそれらについて説明する。

気象学会主催の夏季大学は50年近く前から企画されてきた専門家による気象の講義である。特に小中高等学校の先生方を主な対象として、夏季に2泊3日程度の集中講義として開催されてきた。会場の関係から参加者は100名程度に限られる。最近では、学校の先生よりは気象予報士の肩書で参加される方が増えている。参加者に満足して頂くために、通常の講義に加えてPCとインターネットを用いた天気図作図の実習や、気象研究機関の施設見学なども行われるようになった。

上記の夏季大学では学校の先生や気象予報士を相手に、比較的高度な内容の授業が行われるため、もっと一般の方にも解りやすい気象啓発活動が必要であるとの認識が高まったことから、公開気象講演会の企画が数年前から開始された。春と秋に毎年開催される気象学会は学会員を対象に会費制で実施されるが、この学会期間中に一般人を対象に無料で講演会を開催し、時流に乗った第一線の気象学者による先端研究を解りやすい言葉で伝えるというのが公開気象講演会の趣旨である。地球環境問題や気象防災データの利用、エネルギー問題などのテーマを選んで講演とパネルディスカッションなどが企画され、参加者からの質疑応答も行われる。

春と秋の気象学会の期間中に、学校の先生などの気象教育に携わる一般人を対象に、比較的小きな部屋を借りて座談会形式で開催されるのが気象教育懇談会である。公開気象講演会が講堂タイプの広い会場においてシンポジウム形式で開催されるのとは対照的であるが、学会員から選ばれた著名な講師と一般参加者が対話形式でじっくりと議論できる時間と空間が提供される。気象学会が気象予報士会との共催として、不定期ではあるが比較的頻繁に開催されるようになってきたのが気象サイエンスカフェである。東京で数年前から始まったもので現在は全国に広がり、そのスケジュールをポータルサイトから見る事ができる。街中のカフェを貸切にして、テーブルに座り、飲み物を片手に、一般人が理解できる簡単な言葉で講演者に気象を語ってもらい、そのあとの質疑やディスカッションに十分な時間を設けるのが特徴である。講演者による講

演会ではなく、参加者と話題提供者とがゆったりとした空間の中で議論を楽しむのがサイエンスカフェである。気象啓発活動としては草の根活動的に広がる可能性を秘めており、気象サイエンスカフェには、お天気キャスターや有名人が参加することも多い。

一般向け気象教育という意味で、気象予報士会を中心に出席授業が最近増えていることも注目すべき点である。小学校や中学校にボランティアとして出向き、気象をやさしい言葉で説明したり簡単な装置で雪の結晶や雲、竜巻の発生を実験することで、小中学校の現場において気象学の啓発と普及に貢献している。その成果と実績が教職員の間で広まり、次の企画へとつながることで、これも草の根の普及活動となっている。

気象学会が行っている社会人向けの気象教育としては、上記の事業を充実させるとともに、生活や産業と密着した気象情報や防災情報の普及と高度利用も、今後の気象教育と人材育成における課題である。気象学会は気象の専門家同士の交流を中心に活動してきたため、社会人向けの気象教育や普及活動はあまり得意とは言えない。それに対し、気象予報士会は社会人に気象を分かりやすく伝え、気象学と社会との双方向のコミュニケーションをとることを一つの使命とした専門家集団であることから、気象学会と一般社会とのインターフェースに位置づけられる。気象学会が公益社団法人として社会貢献の機能を十分に果たすためには、気象予報士会との連携が将来的に益々重要になると考えられる。特に、気象サイエンスカフェは、運営は容易ではないが、気象学会と気象予報士会との連携でうまく機能し始めると、やがて全国各地に拡大し、発展的に継続が期待できる普及活動となることから、今後一層の支援が期待される。

5.7 気象予報士会との連携

気象予報士は、天気予報が自由化されるにあたって、天気予報の品質を十分に確保する必要から生まれた国家資格である。天気予報の自由化とは、それまで気象庁の専管事項であった天気予報を、必要な条件を満たしさえすれば気象庁以外でも広く一般向けの天気予報を発表することができるという制度である。ただ、いかに自由化されたとはいえ、重大な防災情報の一つでもある天気予報が、科学的な根拠あるいは技術の裏付けもなしに社会に流され不要な混乱を引き起こすようなことがあってはならないということから、気象庁から出される観測データや数値予報資料などの高度な気象資料を、正しく理解し適切に利用することが

できると認められた者を気象予報士としている。

気象予報士の全国組織として一般社団法人日本気象予報士会（予報士会）がある。予報士会は、気象予報士としての技術の研鑽や気象を通して社会への貢献を目的として1996年に設立された。会員数は年々増加の一途をたどっており、2013年5月1日時点で、およそ3,200名となっている。予報士会の特徴は、会員の大部分が気象の知識以外にさまざまな専門知識をもっていることである。もちろん気象の専門家として気象の予測を行っている者やテレビ・ラジオで活躍しているキャスターもいるが、そのほかには小中学校から高校・大学の教員やさまざまな分野の研究者や学生、国や地方自治体などの公務員、報道関係、医師や弁護士、飛行機のパイロット、食品関連をはじめとして各種の製造業、建設土木やエネルギー関連の分野、あるいは流通・金融機関、IT関連の業務、専業主婦など、まさに社会のあらゆる分野に関わりのある会員達である。これらの気象予報士たちは、それぞれの立場で気象と関わりながら、身につけた知識や技能を役立てようとしている。

予報士会としての主な対外的な活動としては、前節にも述べたように、小・中学生、高校生を対象とした気象教室や実験、あるいは主婦層や一般社会人を対象とした気象知識の普及・啓発の出前事業など、気象予報士としての知識を活かした社会貢献活動などがある。特に最近では、国民の防災と安全・安心に対する要請に応えるため、気象庁と連携して「局地的な大雨に関する気象情報等の活用能力の向上を含めた安全知識の普及啓発の強化」の事業に取り組んでいる。これは、国民一人ひとりが局地的な大雨に対する危険性が身近にあることを認識し、自ら危険を回避できるよう、気象情報等の活用能力の向上を含めた安全知識の普及啓発を強化するということである。つまり、局地的豪雨などの極端気象現象に遭遇したとき、国民一人ひとりがその危険性が身近にあることを認識して、自ら適切な避難行動をとるといった判断ができるように、気象情報等の活用能力や安全知識の普及啓発を行うための活動である。防災はいかに公助・共助・自助の役割を分担するかが大事であるが、その中の自助を効果的にするためには、日頃から災害に対する心構えや気象や防災の知識を身につけておくことが重要であり、その活動に気象予報士会が寄与している。

また現在、気象学会と予報士会の間では、気象サイエンスカフェや秋の大会におけるスペシャルセッ

ションの運営をはじめ、さまざまな部門で連携した活動が進んでいる。夏季大学や教育と普及委員会あるいは地方支部の活動においても連携が進んでいる。

予報士会では、日頃から気象の知識や防災知識の普及・啓発などの活動を行っているが、そのためには気象予報士自身ができる限り最新の気象学の知見や気象技術を身につけておく必要がある。気象学や気象技術は日々発展しており、気象予報士は常に自己研鑽を続け、技能レベルを維持する必要があることから、予報士会では気象予報士に対する技能講習を事業の大きな柱の一つとして実施している。その上で、技能の向上に努めている気象予報士を評価するCPD制度を創設すべく現在準備を進めている。

CPD制度とはContinuing Professional Development、つまり継続的専門能力啓発を目的とした制度である。自己の能力向上・技術力の維持に努めた場合、その個人にCPDポイントを付与し、付与されたCPDポイントを積算・記録していくという制度である。すでにこのような制度を創設している分野もある。この制度では、技能の研鑽の実績を客観的に適正に評価できるものでなければならないことから、予報士会だけでなく日本気象学会をはじめ気象関係団体や民間気象事業者などとも連携して実施することになる。特に気象学会は学術的評価を適正に判断する機関として大きな役割が果たせる。CPDポイントの対象としてはさまざまな技能講習会や講演会および研究会などへの参加、学会での発表、研修会および講演会における講師、あるいは著書の執筆や業務経験などさまざまな活動が挙げられる。CPD制度の導入により、気象情報についてのニーズが高まり、市場の拡大も図れると考えられる。CPD制度は気象予報士を積極的に活用していく仕組みの元になるシステムであるが、このことは今後の気象界の活性化にも寄与すると考えられる。予報士会と学会との連携という観点では、現在、予報士会と気象庁とが連携して気象や防災知識の普及・啓発活動を行っているが、このような活動はさらに気象学会も含めた連携という形で推進するほうが望ましい。学会と予報士会の位置づけとしては、予報士会は学会における研究成果を実社会に役立てるとともに、一方では利用者の立場として社会が求めているところを学会に伝えるというような、一般社会と学会をつなぐパイプの役割も担っているのではないかと考えられる。これからもいろいろな形で気象学会と予報士会が連携を深めていくことが気象界の発展のために

必要である。

6. 提言

日本の気象学を発展させるために、8項目の提言をまとめる。日本気象学会は、会員の声を真摯に受け止め、以下の学術活動を積極的に推進すべきである。

1) 気象学の基礎研究の推進

新しい大気現象を発見しそれに科学的な説明を与える、という基礎科学としての自律的な発展を今後とも推進する。また、気象学・大気科学の普遍的な原理原則の体系化を進める。

2) 地球システム研究の推進

大気は、海洋・陸水・雪氷、生物、大気組成、超高層電離大気など、周辺環境と相互作用する。地球科学に関連する諸学会と連携し地球システムの総合的な理解を目指す。また、古気候学や惑星科学など、学問領域の対象を広げ気象学・気候学の展開を推進する。

3) 観測システムの高度化

衛星地球観測や航空機観測などの大型の観測計画を推進する。宇宙技術やセンサー開発などの工学分野や、データ同化や気象・気候モデルなどの観測データの利用分野と、強力に連携を図り、独創的・効果的な観測システムを提案・構築する。他方、身近な現象の理解や気象情報の利用のために、観測装置の創意工夫や観測ネットワーク構築など草の根的な観測研究活動も強化する。

4) 数値シミュレーションモデルとデータ同化技術の開発と利用

数値モデルとデータ同化は大気現象の理解と気象・気候予測の基盤技術である。組織を越えた協力体制を構築し、数値モデルおよびデータ同化の開発研究を積極的に推進する。計算科学分野との連携も強化する。数値モデルの利用に関する研究を促進し、その普及に努める。

5) 気象予測とその防災および産業利用に関する研究の推進

気象予測の精度向上のために、気象学会と気象庁との連携を強化し、観測システムと数値モデルに関連する技術開発を推進する。防災、運輸、土木、農林水産業、建築、エネルギーなど、気象情報の利用分野との連携を強化し、気象情報の有効活用の研究を推進する。

- 6) 環境問題への貢献と地球温暖化予測の不確実性の低減に資する研究強化
都市環境や越境汚染など環境問題に関連する研究を推進し、適切な情報を社会に提供する。地球温暖化予測の不確実性の低減に努力するとともに、地球温暖化の正確な知識の普及に努める。大気中に放出された放射性物質の拡散に関する研究を推進し、放射能汚染対策等に関する情報を社会に提供する。
- 7) 気象知識の普及啓発
自然現象，気象予測，自然災害，環境問題等，気象に関連する知識や情報の一般社会への普及啓発を図る。1993年に気象予報士制度が創設されて以来，さまざまな専門知識を持つ気象予報士も増えてきている。気象知識の普及啓発に当たっては，気象予報士会をはじめとする，関連団体との連携を強化する。
- 8) 人材育成と男女共同参画
任期制研究ポストに就く若手研究者が増加し，将来への不安が増大していること，女性の教育研究と雇用の機会均等について努力が必要であることから，人材育成，キャリアパスの構築および男女共同参画に向けた活動を強化する。