

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

「気象学の研究・教育の状況と展望—21世紀への新たな貢献に向けて—」および補遺*

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**・
第18期日本学術会議気象学研究連絡委員会***

日本学術会議は、2005年10月1日をもって大幅な改組が実行され、第20期が発足した。この改組により、第19期まで存在した研究連絡委員会の制度が廃止され、日本気象学会に対応する標記委員会も廃止された。第19期委員会では、改組される以前の3-4年に亘って、気象学の研究と教育に関する状況や展望について議論を重ねてきたが、それを2005年8月の時点にまとめたものが本報告および補遺である。但し、日本学術会議からの公式の対外報告の公開は9月初めになされたが、本文の部分のみであり補遺の部分は含まれていない。なお、本文に該当する部分とその要約等は、日本学術会議 (<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-19-t1032-3.pdf>) において見ることができる。

本報告書は、第18期気象学研究連絡委員会と第19期大気・水圏科学研究連絡委員会気象学専門委員会の両委員会の継続審議の結果を取りまとめたものであり、公開された公式の報告とは別に、本委員会で議論した問題の一部を補遺として明らかにしておく。

構成委員は次の通り：

委員長 木田秀次 京都大学大学院理学研究科・教授
幹事 山内 恭 国立極地研究所・教授
委員 藤吉康志 北海道大学低温科学研究所・教授

委員 松田佳久 東京学芸大学教育学部・教授
委員 中島映至 東京大学気候システム研究センター・教授
委員 露木 義 気象庁予報部数値予報課・課長
委員 山崎 剛 海洋研究開発機構地球環境観測研究センター・サブリーダー
委員 廣岡俊彦 九州大学大学院理学研究院・教授
委員 鬼頭昭雄 気象庁気象研究所気候研究部・第1研究室長 (第18期)
協力者 近藤 豊 東京大学先端科学技術研究センター・教授 (第19期)

はじめに

21世紀に入って世界的に大きな状況変化が進む中、我が国における気象学とその関連分野に関わる研究・教育を取り巻く環境も大きく変貌しつつある。気象学は、現在では、地球惑星科学および環境科学等に関する極めて広い内容を包含する研究分野になっている。また、天気予報技術が大規模観測網と超大型計算機の登場で成功を収めたことから、気候予測技術の開発への関心が高まり、より幅広い関係分野との密な交流が必要になっている。このような気象学の動きと重なり、種々の地球環境問題が社会の大きな関心事になり、地球環境変動に対する科学的理解の基礎を確かなものに

* A report with a brief supplement from the Committee of Meteorology of the 19th Science Council of Japan: The present and future of meteorological research and education in Japan.

** The Committee of Meteorology of the 19th Science Council of Japan
(Chairperson: Hideji KIDA).

*** The same with the above except for 18th.

© 2006 日本気象学会

† 本記事は既に公開されている日本学術会議の研究連絡委員会の対外報告に未公開の補遺を付け加えて掲載するもので、対外報告との一貫性を保つため、通常の「天気」のスタイル及び許容ページ数からはずれた形の一括掲載を天気編集委員会で特別に認めたものです。
(天気編集委員会)

する必要が急務になっている。気象学の研究や教育の現状をみると、個々の研究者や教育者の対応には現実的に適切な対応がみられるものの、必ずしも気象学全体の展望という点では取り組みが十分でない面もみられる。

これからの気象学にとって、地球温暖化や気象災害という社会的に重要な緊急課題に応えることが重要である。そうした課題の科学的基盤の構築には気象学がリーダーとしての役割を果たさなければならない。

また、応用研究と並んで、気象や気候の基礎研究の継続と深化を着実に推進するとともに、学生の基礎学力不足や就職問題など、問題が表面化しはじめており改善が必要であることから、気象学の専門教育の強化が不可欠である。

このような時期に第18期日本学術会議気象学研究連絡委員会では、気象学の研究と教育の現状に関する諸問題を検討し、気象学のコミュニティとして目指すべき取り組みの方向性を示す必要があると考え、研究や教育上の問題点、さらに現状に対する要望などを把握する目的でシンポジウムを開催し、また気象分野ではかつてなかったアンケートも実施した。

なお、上記シンポジウムは、第17期気象学研究連絡委員会がシリーズ・シンポジウム「気象学に拓かれゆく世界」(第4回)において、テーマ「揺れ動く21世紀の大学・研究所の将来像」として取り上げ、主として日本気象学会員を対象にし、春季大会(2000年5月23日)に合わせて行った。そして、それを受ける形で2年後に、第18期気象学研究連絡委員会がやはり日本気象学会春季大会(2002年5月22日)に合わせてシンポジウム「21世紀の大学・研究所の将来像」と題して実施した。後者については、同学会の機関誌に詳しい報告がある(松田ほか, 2003a, b; 2004)。

また、アンケートについては、全国の大学、研究所、省庁などで気象・気候に関する研究・教育に携わっている人達および関係院生などを対象に、「研究と教育に関する現状と希望」を把握するため、第18期気象学研究連絡委員会が2002年3月に実施したものである。その集計結果については学会の機関誌に報告されている(中島, 2004)。

これらの結果も参考にしながら、第18期気象学研究連絡委員会と第19期気象学専門委員会とが連携して審議を継続し、本報告書をまとめた。

本報告で、気象学および関連する幅広い分野の研究者、教育者、さらに学術政策関係者等が現状の把握や

将来像を考えるに当って参考にして頂きたい見解を提供すると共に、関係施策に対する要望を示す。

第1章 気象学とその関連分野の研究環境の概況

近年の財政緊縮化の中で、科学研究費(科研費)、環境省地球環境研究総合推進費などの研究予算は、最近5年間においては現状維持もしくは暫増が続いている。学術振興会への科研費移管に伴う研究予算の配分とその実行に関する効率化や、国立試験研究所や国立大学などの法人化による予算実行上の柔軟化などについても、研究に関わる予算システムは細部には改善が望まれる点はまだあるとしても全体としては改善されつつあるといえる。また、研究予算の競争的運用とその透明化によって、研究者の側に競争原理の認識と機会均等化への改善も図られつつある。このような状況変化は、当委員会によるアンケートでも読み取れるように、研究者にはおおむね歓迎されている。しかし、その一方で、研究業績や研究課題などの評価システムについては問題点も指摘されており、今後とも検討され、改善が図られることが望まれる。

気象学およびその関連分野における研究予算は、この数年においては、地球環境の変化に関する課題に重点的に配分される傾向がみられる(資料1参照)。

1.1 大型基礎研究1

文部科学省の科研費特定領域研究による大気関連の大型基礎研究は、最近では、常に1~2件が走っている。この数年では、「北極域における気候・環境変動研究」、「赤道大気上下結合」、「東アジアにおけるエアロゾルの大気環境インパクト」など、大気循環から大気化学環境に至るまで幅広い視野に立っての総合的観測研究が実施されてきた。これらの基礎研究は、近年の重点化施策の流れの中で、研究者の自由な発想による独創的な研究の掘り起こしと、重点化研究に向けた基盤作りにとっても重要であり、一層の充実が期待されよう。

一方、重点化研究は、最近では大きく進んでいる。例えば、超大型計算機の「地球シミュレータ」の運用開始とそれを活用して行う研究である「人・自然・地球共生プロジェクト」によって、地球環境や気候に関する極めて大規模な数値モデルの研究が実施されており、この研究分野の大きな可能性が拓かれつつある。これに触発されて、欧米でも我が国の地球シミュレータを上回る超大型スーパーコンピュータの建設ラッシュが続いている。我が国において、地球シミュレー

タ利用により世界をリードする研究を成長させるためには、次世代の地球シミュレータを一刻も早く開発し実現する必要がある。それと同時に、また共生プロジェクトに続く次世代のモデル研究を始める必要がある。

1.2 大型基礎研究2

環境省の地球環境研究総合推進費では、「オゾン層の破壊」、「地球の温暖化」、「酸性雨」などが大気関連研究として実施されている。また、砂漠化問題に関連して黄砂観測の国際的な枠組み作りが検討され、国連環境計画（UNEP：United Nations Environment Programme）のABC（Atmospheric Brown Cloud／大気褐色雲）プロジェクトに対して研究予算が認められている。このように環境省での大気研究は、環境対策に深く関わるものが実施されている。最近では、研究参加の競争原理と透明化が計られており、大学研究者が代表者を務めるプロジェクトも増えている。環境対策は今後ますます重要になってくるため、環境研究の規模の増大は必然であろう。

例えば、上述のABCプロジェクトにおいては、韓国気象庁とソウル大学等が共同運用する済州島での観測基地が基幹基地として設営されたが、このように行政業務と大学研究との機関間の協力的な観測体制が生まれ始めている。これに呼応して、我が国では辺戸岬に環境省と大学で合同観測が可能な基幹基地が建設されつつあり、大気観測の効率的協同実行の良い例になっている。このような研究的観測網の活用は、地球観測サミットで検討中の地球観測システム（GEOS：Global Earth Observing System of Systems）計画においてもその重要性が認識され奨励されている。

1.3 人工衛星による地球観測

宇宙航空研究開発機構（JAXA：Japan Aerospace Exploration Agency）の総予算は、ここ数年減少がみられる。そのような傾向を背景に、ロケットや衛星の事故対策のための予算が必要になっているため、人工衛星による地球観測の利用研究にまわして欲しい予算の拡充が十分でない。拡充とは逆に、地球観測関連予算は削減されているのが現状であり、早急に輸送系と衛星系との間でバランスのとれた予算運用と協同的研究の発展を期待したい。

このような困難の中ではあるが、JAXAの地球変動計画（GCOM：Global Change Observing Mission）、JAXA-環境省協力の温室効果ガス観測衛星（GOSAT：Greenhouse gases Observing Satellite）計画、日米協力の全球降水観測計画（GPM：Global

Precipitation Measurement）計画、日欧協力の地球観測計画（EarthCARE）などの新しい地球観測の計画が芽生えている。これらのミッションは、多機関および多国間の協力によって進められており、限られた予算の中で互いに有効な国際貢献を行う努力がなされている。予算の有効利用のためにも、宇宙ステーションの地球観測への有効活用について、防衛衛星の気象災害監視への活用など含めて、議論を起こしていく必要があるだろう。

気象庁の静止気象衛星観測については運輸多目的衛星（MTSAT：Multi-functional Transport Satellite）の研究活用が望まれる。他方、中国の静止衛星の実用化や韓国の静止衛星計画が進むなど、新たな情勢が生まれている。これらを考慮しながら、JAXAや気象庁などには、引き続き、あるいは新たに地球観測衛星システムにおける国際貢献度を向上させるとともに、東アジアにおける地球観測衛星技術の進歩を背景に、例えば、アジア共同運用の地球環境観測衛星の実施などを期待したい。

1.4 地上の観測網

我が国のイニシアチブにより推進された地球観測サミットを軸に、地球観測システム（GEOS）の実現への動きが始まり、文科科学省の地球観測国際戦略策定検討会によって省庁間横断による検討が行われている。この地球観測システムが目指すところは、時々刻々変動する気象状況の他に、健康や農業など日常生活や人間活動に役立つ総合的な観測データを集約し、そのデータを利用したい側に供給することを可能にするシステムの確立である。そのためには、行政業務機関が管理する既存観測網のみならず、研究コミュニティによる様々な観測システムや不定形の観測データをも対象とすることが重要になってきている。これは、今後ますます深刻化するアジア域での人間活動の環境影響に対する監視という観点からも重要である。我が国の海洋観測は、観測船「みらい」や「トライトン型ブイ」など、欧米に比べて観測データに関して優位である。しかし、大気観測では、専用の観測航空機も持たない点で、我が国の観測体制は遅れているので、今後、アジア域の様々な観測網の整備を展開することが重要であるとしても、観測専用の航空機導入が強く望まれる。

一方、観測の自動化技術や解析技術の進歩がみられ、研究コミュニティの範囲で個々に提供される大気に関する地上観測も序々に実用的な観測システムに組み込

める可能性が高まりつつあり、我が国では国立環境研究所の NIES-Lidar Net や JAXA の SKYNET などの限定的観測網では自動運用が始まっている。これらの研究コミュニティのネットワークと気象庁を始めとする行政業務機関の観測網との連携が着実に前進することを期待する。

1.5 大学における研究

2004年度に始まった大学法人化により大学内における研究・教育体制は、変わりつつある。北大、東大、名大、京大などに見られる「環境」を冠する大学院の研究科や専攻の創設、および大学附属の研究所改組など相次いでおり、学部再編とともに、気象学や地球科学の大学内における位置づけにも変化が生じている。また、総合地球環境学研究所（京都）や地球環境フロンティア研究センター（神奈川）などの法人研究機関が創設され、大学外での組織的な地球環境研究が始まっている。こうした動向は、将来さらに環境学と地球科学との間において新たな枠組みへの再編の可能性を示唆している。

他に、気象学と環境学との関連研究において、千葉大環境リモートセンシングセンター、東大気候システム研究センター（CCSR）、名大水循環研究センターなどの研究センターが行っている特定課題に特化した研究活動の役割と意義は大きいといえる。例えば、CCSR では気候モデルの開発・応用研究や若手のモデル研究者育成に貴重な貢献をしている。こうした各大学における個別課題の研究センターの役割とその存在の重視は、大学内での他分野との関係を活性化させ、また、各大学間の関連研究センターの連携は、各々の特化されたモデル研究や観測研究らの総合化の実行の可能性を有している。この状況は、今後とも継続、強化していくことが望まれる。

第2章 地球環境変動の研究の推進

2.1 地球温暖化および気候変動の予測

地球温暖化は、その懸念や警告が1980年代半ばに関心を集め始めて以後、問題の深刻さが広く社会に理解され、地球環境問題の中でも特に規模の大きな問題として認識されるようになった。

気象学は、この地球温暖化問題に当初から深く関わり、今日では、気候の将来を予測するという最も重要な課題を背負っている。この社会的責任は重大である。すなわち、地球の研究の一貫として単に科学的興味から気候を研究するというに留まっていればなら

ず、研究の重要成果として、気候の将来予測を可能にする知の集積と技術の開発を前進させることが必要である。

かつて気象学は天気予報を最も身近で重要な課題としたが、これは今日では「天気数値予報」という数値シミュレーションの手法でほぼ成功裏に実現された。この分野では、米国においてノイマン式の電子計算機が発明された20世紀半ばの最初の計算機利用テーマが天気予報の計算であったという歴史的事実から察せられるように、気象学の研究と高速計算機の進歩の関係は極めて密接である。

ただし、注意すべきところは、1～2日先の天気予報と、何年か先の気候の将来予測とは、必要な知見に差異があることである。前者では、初期条件と呼ばれる現時点での大気の状態を精度よく知ることが特に重要であるが、後者では、必ずしも初期条件は問題でなく、境界条件と呼ばれる地表（陸面・海面を含む）の状態や大気組成の変化などが重要になる。すなわち、気候の予測に必要な知見は、大気圏以外の知見をも必須とするのである。この点で、気候の予測は、天気予報の単なる延長線上にあるという訳では全くなく、より広範な知見の体系的進歩を基礎にして始めて成り立つものである。

地球温暖化という人類の重要課題に対する気象学的対応として、気候の将来予測の科学的基盤を掘り下げ、予測の可能性を高めることを目標とすることが特に重要である。そのために、我が国において、地球温暖化に関する気象学分野における研究体制の一層の充実・強化が急務であり、長期的視野に立った施策の実行が必要である。

さて、気候変動に関する政府間パネル・作業部会1の科学的評価報告書（IPCC WG1 Report 2001/Intergovernmental Panel on Climate Change）では、種々の気候モデルの特徴と予測結果の評価が一つの章を割いて詳しく記述されている。その評価の根拠には、国連世界気候研究計画（WCRP: World Climate Research Programme）の相互比較実験という調査、すなわち各国所有の種々の気候モデルを相互に比較して結果がどのように異なるかを確認する実験で、各モデルが採用している諸物理過程やそれらのサブモデル化（パラメタリゼーション化とも呼ばれている）の精度評価、さらにモデル総体として再現されたモデル固有の気候特性の評価まで、幅広く種々のモデルを取り上げて行われている調査が存在する。しかしながら、

雲・エアロゾルの微物理過程や放射過程など、気候モデルの諸物理過程の精緻化に対して、その精度評価をするに足るだけの基準としての観測データが不十分である。従って、気候モデル開発に歩調を合わせるためにも観測の一層の充実が不可欠である。また、種々の気候モデル固有の再現気候のゆらぎ幅を小さくするため、古気候の再現と古気候データとの比較が行われ、古気候が成るべく忠実に再現できる気候モデルとなるよう、モデルに必要な不確かなパラメータの値を調整(仮定)したりしている。しかしながら、古気候データそのものにも不確実性が多く、比較の対象として適当かどうかなど、さらなる古気候研究の発展が必要である。すなわち、地球温暖化の将来予測の進歩には、古気候に関する詳しく、且つ、精度の高い研究も必要になる。

現在、「地域」の気候変動に関する新しい予測モデルの技術開発が必要になっている。その観点から、10 kmの積雲スケールの現象まで適切に表現できるような超高分解能で全球をカバーする気候モデルの開発が急ピッチで進んでいる。近い将来、より詳細な地球環境変動の数値シミュレーションを可能にするであろう。そうした気候モデルには、温室効果ガスの増加の他に、大気中のエアロゾルが作り出す放射過程も適切に組み込む必要がある。そのためには、ガスとエアロゾルを適切に表現できるような大気化学過程のサブモデルが不可欠である。さらに、エアロゾルの雲への影響のサブモデル化も重要な課題であろう。

炭素循環や大気化学の過程などが表現できる温室効果ガスのサブモデルは、現行の気候モデルにおいては、気候自体との相互作用は考慮しないオフライン手法で実行されているが、最近になって、気候と温室効果ガスとの相互影響過程を組み込んだオンライン手法の気候モデルの開発研究が行われた。

さらには地表の植生や氷床に関するサブモデルまでオンライン手法で扱うなど、「気候システムモデルから地球システムモデルへ」と発展しつつある。総合科学技術会議の地球温暖化研究イニシアティブにおいても、生態系や人間社会と気候の間の複雑な相互作用を取り入れた統合モデルの開発による高精度予測を行うことが、温暖化将来予測・気候変化研究プログラムの中・長期的目標として掲げられている。地球システムモデルという言葉は、より一般には固体地球の変動性も含んで使われる場合が多いが、固体地球の諸条件は気候システムモデルでは外部境界条件として変動しな

いものとして扱われており、現時点では、固体地球システムと気候システムとの双方向性の研究を行うには時期尚早であろう。しかし、研究発展として、固体地球の諸条件変動を含む地球システムモデルも研究されてよい。その場合、諸プロセス間の時間スケールの違いの問題や、今世紀の時間スケールで考えると、どの過程が有意に効いてくるかなど、解明すべき問題が多いが、知的関心は高い。地球システムを総体として理解しようとする研究動向は、地球科学の発展として必然であろう。

地球温暖化の予測を含めて気候の予測は、どの空間スケール、どの時間スケールで可能なのかについて議論を深める必要がある。この問題については、後節においても論じられるが、気候の予測は、日々の天気そのものより長い時間スケールの統計量を予測対象とすること、また、大気中の現象よりも長い時間スケールで変化する過程が存在するであろうことを前提にしている。エルニーニョ現象とその直接の影響下にある地域の季節予報が一例である。つまり季節変化の時間スケールで変動するエルニーニョ現象がもし予測できたら、そのエルニーニョ現象に影響されて生じるその時その場の気象や天候の予測は可能である、と考える。

それで、大気海洋陸面系にはどのような長期的なメモリ過程があるのか、それらは予測可能で気候予測に使えるものか、十年スケールの海洋変動や太陽活動とその影響はどうか、等々、季節予報から温暖化予測まで、それぞれの時間スケールで、かつ、それぞれの空間スケールでの、またそれぞれの地域においての、気候予測可能性についての確認を確かめながら研究をすすめる必要がある。

2.2 大気観測網の広域展開

大気に関する衛星観測の発達の背景には、地球温暖化問題に対する社会の高い関心の現れがある。NASAの地球観測計画(EOS: Earth Observing System)、我が国のADEOS/ADEOS-II(地球観測プラットフォーム技術衛生「みどり」/Advanced Earth Observing System)計画、ヨーロッパのENVISAT(環境観測衛星/Environmental Satellite)計画などにみられるように、人工衛星からの大気と地球表層の遠隔観測(リモートセンシング)が1990年代後半から大きな発展を遂げてきた。受動型センサーは、感度、波長数、空間の分解能を増し、またマイクロ波散乱計や降雨レーダーなどの能動型センサーの利用もある。その結果、人工衛星の観測システムから、気温や気圧などの大気

物理構造と化学物質濃度などの豊富なデータが得られるようになった。それにともない、さまざまな観測技法が開発され、地球大気と地球表層の全球的知識が飛躍的に増大したといえる。その結果、衛星観測結果と気象・気候のシミュレーション結果の全球規模での比較や、観測の及ばない部分を推定する技法（データ同化）も発展し、気候モデル開発や気候データセット作成に大きく貢献した。特にマイクロ波放射輝度の利用は、気象データの解析や予報精度向上にとって必須の存在となりつつある。今後は、より多くの衛星観測とその利用技術が発達していくが望まれる。

一方、気候モデルと対をなして発展し始めているのが広域の観測網とそれを支える技術開発である。GCOS (Global Climate Observing System) 計画や GOOS (Global Ocean Observing System) 計画に代表されるような大気・海洋の全球観測網が確立し始めている。また、ARM (Atmospheric Radiation Measurement) 計画の地上観測基地や航空機観測によって代表される放射収支観測と化学組成観測、雲微物理過程観測などが総合的に行われるような高度な観測技術が確立しつつある。他に、NASAのエアロゾル観測計画 (AERONET) で象徴される精度が高く高密度なエアロゾルデータを提供できるようなネットワーク技術も発達している。今後も、大気物理・化学過程の重要なパラメーターがより多く入手できる新しい観測網が発達していくことを期待したい。

以上のような大気観測とモデル開発における最近の大きな発展状況を見ると、我が国は必ずしも楽観視できない現状にある。例えば、我が国には大気観測専用の観測航空機がない。そのために、欧米諸国との研究成果の差は大きく開いており、近い将来さらに競争力の低下を生み出す可能性をはらんでいる。我が国における大気観測とモデル研究の推進に効果的に投資することで、我が国の独自研究と並んで、国際貢献へのポテンシャルは大きく高まるものと思われる。

2.3 極域の大気環境の観測

南極や北極という両極地における気象・気候学的研究は、最果ての領域、知られざる大陸の探検から始まっている。ナンセンのフラム号による北極海漂流、アムンゼン、スコットらによる南極点到達競争など数多くの極地探検を通じて、極地の気象が明らかにされていった。ソ連時代の長年にわたる北極海の海水氷上漂流ステーション観測 (31基地) や国際地球観測年 (IGY: International Geophysical Year) に定常化された南

極観測を通じて、極域の気象、気候の研究は著しく進展した。そして、今や極域の研究は地球規模の大気環境とその変化の研究になくってはならない地域となっている。すなわち、地球の熱エネルギー収支では冷源域として、また、雪氷は地球気候を左右する。また、オゾンホールで知られるように大気中の物質の循環にとっても特別の役割をもつ地域である。他に、極域雪氷圏での水収支は世界の海面水位の問題に関係する古くて新しい問題である。

一方、極域は著しい低温、一日中太陽の出ている白夜や極夜の存在など極端条件がそろっているため、特有な現象が多数見られる地域でもある。夏季の極中間圏雲(夜光雲)、冬季の極成層圏雲は、中低緯度では現れない高緯度中層大気特有の雲であり、特に後者はオゾンホールをもたらし光化学反応に深く関連している。極中間圏雲は、産業革命以降に発生したと考えられており、気候変動のカナリアとも呼ばれ、気候監視の意味で今後とも注目すべき現象である。南極大陸の単調な大陸斜面地形は、カタバ風と呼ばれる地表面に沿って吹き下ろす風をはじめとする珍しい気象の実験場にもなっている。しかしながら、厳しい自然条件のせいで、その観測の程度は、中低緯度に比べると未だ十分ではない。今後、これらの大気現象の物理や、現象を維持している大気の力学過程を解明するために、中緯度や熱帯での実績のある大型大気レーダーの設置など先進的な観測計画を推進する必要がある。特に、南極は北極に比べ東西一様性が高いので、地上観測や気球観測設備の存在する昭和基地での観測を充実させ、国際的な南極一大観測拠点とすることが望まれる。観測点の少ない極域現象の把握には人工衛星観測が必須であり今後ますます発展が期待される。昭和基地の充実した観測は人工衛星観測の地上検証データの提供という点でも重要である。南極の広い一様性のある地表面は、海上と同様に地上検証に最適な場所と考えられる。そして、これらの精密観測データと数値モデルを組み合わせた研究により、より包括的な理解へと発展させることができよう。

極域、特に南極域は、人間活動の盛んな北半球中緯度から地球上で最も遠く離れた場所として、人間活動の影響の最も少ないバックグラウンド(清浄大気)の監視に最適な場所である。アムンゼン・スコット南極点基地をはじめ昭和基地でも、大気中二酸化炭素濃度の連続観測ほか多くの項目のモニタリングが続けられており、清浄大気中での微小な変動から大気中物質の

長距離輸送過程や地球規模の気候変化の診断に役立っている。

さらに、極域には長年にわたり降り積もった雪が氷床や氷河を形成していることで、過去の気候や大気環境の記録が残されている。氷床を掘削した試料、氷床コアを解析することで、過去の気温をはじめ大気中の二酸化炭素濃度などの情報を得ることができる。わが国でも南極大陸内陸のドームふじ観測拠点での2500 mの深層掘削により過去32万年に遡る気候・環境が明らかにされ、さらに氷床下岩盤までの掘削を進めることで、百万年までの氷期・間氷期サイクルの古気候の解明や二酸化炭素濃度と気候変動との因果関係などの研究が目指されている。これらの結果は、地球の将来を予測する気候モデルの検証手段として貴重なデータを提供するものと期待されている。

地球温暖化が大きな課題となっている現在、「世界の海面水位に大きく影響する南極氷床はどうなるのか？北極海水は消えてなくなるのか？」といった、極域がいかなる応答を示すか、いかなる役割を果たすのか、その答えが求められている。この課題は、一面では氷河・氷床の問題、海水の問題として雪氷学の課題であるが、雪氷圏は決してそれだけでは存在し得ない。中・低緯度からの熱や水蒸気輸送、降水、積雪涵養、棚氷の流出・融解、淡水の流入、海水の変動、深層水底層水の形成、いずれをとってみても大気や海洋からの強い影響下、密接な連なりの中にある。極域海洋からの生物活動によるDMS(硫化ジメチル)の発生、エアロゾルや雲の生成への寄与など、生物圏との関わりも含め極域における地球システムとしての取り組みが必須である。

1957-58年の国際地球観測年(IGY)から50年経過し、2007-08年には第4回国際極年(IPY)を迎えようとしている今日、最も早急な課題として求められていることは、基本的な気象観測点の維持拡充である。例えば南極域における高層気象観測点はIGY期には17か所あったものが、現在では12か所に減ってしまい、この維持もままならない。そして南極・北極域の物理過程をよりよく理解した領域気候モデルをはじめとしたモデルの構築、観測点の少ない極域での3次元大気構造をおさえる気球、航空機、船舶、無人探査機といった観測プラットフォームの充実であろう。これら研究の手段、ツールの充実を通して、より質の高い研究の推進が期待されよう。

2.4 局地的および都市の気象・気候の研究

地球温暖化の問題において、グローバル平均などの気候は、ある程度の範囲にはいる精度で予測可能になってきたが、ローカルの気候に関してはまだまだ不十分な予測しかできないという評価が広くなされている。ここに二つの疑問がある。グローバル平均については見当はずれではない精度で予測できるがローカルの予測となると極めて難しいとはそもそも何を意味しているのか、そして、ローカルの予測ができないのであればグローバルの予測も当てにならないのではないのか、という素朴な疑問である。これは、明日の天気予報も当たらないのにどうして長期予報を信じられるか、という疑問に似ている。このような問題については、気象(定量的には平均値からの偏差として表現できる現象)と気候(長い時間や広い空間における平均値で表現できる現象)との差異を考えれば、おおよそ答えは得られるだろう。すなわち、偏差の予想は平均値の予想よりもはるかに困難である。

そのようにローカルの気候予測は難しいが、予測以前に、ローカルの現象は、身近でありながらどの地域においても、十分に細かい分解能の観測がそもそも不足しており、そのため意外なほどに実態が分かっておらず、ほとんど未知な領域になっている。この事実には大いに注意を引くべきである。このように、局地的な気象観測は極めて観測が少なく、大気的最下層である高さ1~2 km以下の大気層(大気境界層)には未だ認識すらもされていない気象現象が満ち満ちている可能性がある。特に、複雑な地形や地表面に影響された各地の地域特有の気象や気候に重要な現象の発見が残されている可能性がある。従って、グローバルあるいは大規模な気候変動の予測がおおむね成功したとしても、それらが各地の局地的気候変動とどのような関係になるかは不明である。人間や生態系は、そうした局地的気候環境の変動に影響されるから、地域を重視した地球環境変動の研究が重要である。

さらに、20年程前から、「ヒートアイランド現象」のような、都市の気候に対する人間活動の深刻な影響が開始しており、都市の環境変化の研究とその予測技術の開発が重要な緊急課題になっている。地球温暖化とは別途に、都市の温暖化が進行していて、詳しい研究が必要になっている。特に、局地気候モデルによる研究では、天気の変化をもたらす低気圧や高気圧のような大規模な風系の日々の変化が、各地域の局地気候に対してどのような影響を与えているかについて十分な

研究がまだない。このための研究手法として、大規模風系モデルと局地気候モデルとを結合する計算技法が開発されており、それを活用した研究も効果的である。

第3章 災害気象・気候の研究強化

3.1 局地的豪雨の予報精度の向上

20世紀の半ばに開発された数値天気予報の手法は、気象の力学、計算機、および気象観測技術などの進展により、この半世紀の間に大きな進歩を遂げ、数時間先の天気予報から1年程度先の季節予報まで、主観的予報を排しての客観的天気予報のための技術的基盤になっている。1990年代には、種々の新しい天気予報のための新技術が種々実用化され、今後さらなる発展が見込まれている。また、数値予報システムを活用して作成できる過去の気象状態の再現データ（これは「再解析」データと呼ばれている）からは疑似観測データが得られ、これが気象学・気候学研究に広く利用されるに至っている。

現在の天気予報における最も大きな課題は、熱帯低気圧や集中豪雨など社会や経済への影響の大きな災害気象現象の予測であり、それらの発現確率的な予測情報を一刻でも早く社会に提供するという問題である。世界気象機関（WMO: World Meteorological Organization）では、これらの現象を重点的な予報対象と定め、一般的に天気予報可能期間の限界とされる2週間先までの予報精度向上を目指す国際研究開発プロジェクト（THORPEX: A Global Atmospheric Research Programme ソーペクス計画）を、大学やそれ以外の気象研究機関などと気象庁のような行政業務機関との密接な協力の下に推進している。ここで重要なことは、流体の傾圧不安定性力学など特定のメカニズム理論に基づくことの多かった従来の予測延長可能性の研究を越えて、地球スケールの現象から、温帯低気圧や台風などの総観スケールの現象、さらに積雲対流スケールまで、多様な現象について、スケール間の相互作用や熱帯・中緯度の相互作用などを考慮した予測可能期間延長のための研究が求められていることである。

また、気象学の研究成果が、天気予報という実用にいっそう貢献できるものとなるためには、気象擾乱の発生・発達などに関する従来の定性的理解を定量的理解にまで深化させ精密化していくことが必要である。積雲対流系の力学については、大規模な風系との相互作用や、大規模な大気状況の違いによる積雲対流の発現の違いなどが扱えるモデル開発が進歩すれば、集中

豪雨などをもたらす積雲対流系の予測可能性の改善に大きく貢献すると期待され、災害を予防するための予測モデルとしても実用に供することが可能になるであろう。梅雨期の豪雨は極めて局所的であることが知られている。こうした現象を予報することは、気象学の最も重要で緊急な課題であるといえる。

幸い最近になって、並列型コンピュータによる超大規模計算が可能になったことにより、迅速性が要求される数値天気予報の分野でも、雲物理過程のような規模の小さい現象を陽に扱えるモデルが、狭い領域に限定した数値天気予報モデルとして使われ始め、集中豪雨の予報の可能性が高まりつつある。

将来的には、雲の物理過程に関する詳細なデータが人工衛星観測から得られるようになり、気象庁の数値天気予報にとって重要なデータとなるであろう。これらのことは、気象庁における数値予報システムが提供する予報データを用いれば、小規模低気圧や雲物理過程などのメカニズムの研究が可能になる状況になりつつあることを意味している。従って、この分野において大学や気象研究機関と気象庁との協力研究を発展・強化する必要がある。

3.2 台風の予報

2004年は、台風の当たり年と呼ばれたほど、日本に接近し上陸する台風が記録的に多く、台風による局地的な豪雨や長い時間続く雨など、降水量の多い雨のせいで水災害が多発した。しかしながら、なぜ台風がそうなったかという原因に関しては必ずしも明らかでない。低緯度の北太平洋における海面温度が例年の温度より1-2度ほど高く、かつその高い海域の範囲が日本付近にまで及んでいたことなどが原因の一つと指摘されている。しかし、なぜ海面温度がそのように高くなったかについては説明できていないから、問題を先送りしているだけの感がある。

台風は、日本にとっては夏季の常といえる嵐であるが、災害をもたらすことで困った気象である一方、日本域の水補給という面では重要な気象ともなっている。台風が、天気予報の対象として考えられ、ある程度の予報ができるようになったのは、そう昔ではなく、1960年代に入ってからといえるだろう。その予報に威力を発揮した道具が気象衛星であった。それまでは、台風の眼の位置さえ把握するのが難しかったのである。米軍の気象観測機は台風に接近して、時には眼の領域に入って気象観測をしたので、その観測の一部の情報を利用して台風の位置や規模などを知ったのであ

る。最近では、天気数値予報の技術が向上し、台風が発生して後の進路が数日前から、かなりの精度で予想できるようになっている。

一方、台風がどのように発生し発達するかという問題は、最大の課題の一つであったが、1960年代半ばから10年ほどの間に、台風の力学理論が日本人研究者達によって発展せられ、謎の大筋は解明された。

こうして、現在、台風について必要とされる知見は、地球温暖化によって台風が多く発生するのか、また、日本域に接近し易くなるのか、台風は強まるのかどうか、などなどである。すなわち、台風に関する気候の変動とでもいえる将来の予測情報である。この課題については、地球温暖化予測の研究の中で特に注目して研究されるべきであろう。

3.3 異常天候の予報

季節を通して、夏季なら冷夏とか暑夏とか、冬季なら暖冬とか寒冬とか、年ごとに季節の特徴が変動するのが常である。一体、これはどうしてか、という重要な問題が存在する。この問題は解明が非常に難しいとされている。その理由の一つは、季節という時間スケールが、個々の気象現象が潜在的にもつカオスの時間スケールの2週間という時間スケールより相当長いということが関係している。すなわち、大気は、個々の気象に関して、2週間よりも長い寿命の現象を有していないと考えられ、2週間前の現象と今の現象との間に、必然的な関係が無いということになるからである。これについては別の節(2.1)などでも論じられているが、2週間よりも長い大気現象は無いのかという望みを捨ててはいないことと、仮に大気中にはそういう長寿命の現象が存在しなくても地表面の何かの現象、例えば、海水面温度とかにそういう現象があれば、気象はそれに影響されるという過程を通じて、見かけ上、長寿命の現象が生じる可能性は残されている。そうした現象の例としては、熱帯東部太平洋の海水面温度の年々変動で、エルニーニョなどがある。しかしながら、季節の年々変動との関係は、未解決である。

季節や月の時間スケールで生じる長期の異常天候は、社会生活にとって影響が大である。それだけに異常天候や異常季節の予報の可能性を向上させることが重要な課題になっているといえる。

第4章 気象学の基盤研究の充実

4.1 大気循環システムの研究

20世紀半ばから、気象の力学理論の研究は、気象学

全体の中でも中核的役割を担ってきた。具体的には、傾圧不安定論(温帯低気圧の発達理論)や成層圏の力学や熱帯波動論等々が展開されてきた。これらの研究においては、理論的研究が中心となっており、気象力学すなわち理論というイメージを与えている。現在では、線形論およびその延長上の非線形論を中心とする比較的単純な理論的研究で解決するような問題は、ほとんどなくなっている。そのために、気象力学という分野が重要性を減じているような印象を与えているかもしれない。しかし、2004年度の気象学会春季大会シンポジウム、「2003年の日本の冷夏—異常気象をどこまで理解・予測できるか」の講演題目を見ても、「北半球ダブルジェット」、「オホーツク海高気圧」、「ダイポールモード」、「北極振動」、「欧州熱波」など全て、気象力学の対象とすべき現象である。また、学会が主催した公開講演会などの「地球温暖化と異常気象」を見ても、異常気象とか「地球温暖化によって台風や低気圧はどうか?」などのキーワードや講演題目は、気象力学と無関係では、この種の研究も成り立たないことを示している。

そうではあるが、これらの研究の手法をみると、理論的な研究の占める割合は多くはない。もちろん、テレコネクション(遠隔影響)を説明するためのロスビー波の水平伝播論や、東西非一様場での傾圧不安定論や伝播論など、理論的な研究も日本の内外で行われている。しかし、気象データが整備されてきたことによりデータ解析的研究が容易になったこと、さらには、計算機の性能の画期的向上と数値モデルの普及により数値シミュレーションが手軽にできるようになってきた、という近年の事情がある。そのため、解析的研究や数値シミュレーションによる研究が、上に述べたような研究テーマでも主流になってきているのが現状である。もちろん、その背景には、上にも述べたように、研究対象が、単純なシステムではなく色々な要素が絡み合った非線形系となってきたこともある。

このこと自体は悪いことでは決していないが、機械的なデータ解析やブラックボックス的な数値シミュレーションだけではなく、力学的な因果関係を考えるような研究も必要であろう。そういった意味で、ある段階で気象力学的な研究も必要になってくると思われる。それは、蓄積された事実を力学的に説明し体系づけるためにも、また、データ解析やシミュレーションのための分析の指針または道具としても重要であろう。他方、気象力学の方も、既存の理論的枠組みの発展だけ

ではなく、積極的に具体的な問題を取り上げて行く必要があるであろう。

4.2 雲・降水システムの研究

雲は、地球上の水循環、エネルギー循環、物質循環、そして大気の運動そのものに大きな役割を果たしている。したがって、雲及び降水システムをモデルの中でどれだけきちんと扱っているかによって、天気や気候予測結果が大きく左右される。また、雲量や降水・降雪量は、土壌水分量の変動、河川流出、海洋への淡水供給、そして植物を含む生態系の成長、海水の成長や融解にとって重要な要因であり、かつ雲の発生・消滅はこれらの地球表層の状態を含む広い意味での地形効果からフィードバックを受ける。しかしながら、雲の取り扱いや、雲が存在する大気条件下での水収支や放射収支の計算は現今のモデルでは極めて不十分であり、気象・気候モデルで最も不確定性を大きくしている要素のひとつである。その理由は、雲は時空間変動が激しく、かつ雲の物理特性はそれを構成している雲粒と氷晶の粒径分布に強く依存しているためである。

雲・降水システムの研究は、難しい段階にある。現在の関心は、激しい気象現象（豪雨・豪雪）のメカニズム解明と予測に重視されている。しかし、モデルの多要素化や高解像度化、他分野（海洋、水文、雪氷、生態、人文）との協力が進み、モデルの改良や検証の上からも測定項目が多様化せざるを得なくなってきた。その結果、エアロゾル、境界層、上・下層雲・非降水雲など、水循環、乱流・放射エネルギー収支、物質輸送、およびそれらの基となる素過程を総合的に研究する「雲科学」として推進することが必要となってきた。と同時に、確かに水蒸気の凝結という共通点はあるが、我々が目にしている様々な雲あるいは降水システム単純に同一線上で扱う単純化は避けるべきであろう。

また、観測及び実験研究向上への長期的支援の必要性も強調したい。やや極端に言えば、どの場所で何時、何をどの程度の精度で測るべきかという観測計画は、モデリングや解析を専門に行っている研究者が立案すべきではないだろうか。モデルが急速に発展した背景には、低価格で高速なパソコンの普及、地球シミュレータのような高速並列コンピュータの出現と同時に、ソースコードが完全公開された雲解像モデルの共有化が挙げられる。それに比べて、観測費用は高く、一方、観測技術そのものはあまり進展しておらず、かつ観測的研究体制（人的資源も）が弱体化している。すなわ

ち、モデルの検証、あるいは新しい現象発見としての観測の役割が十分に果たせなくなっている。コンピュータとは異なり、観測装置や実験装置はどこの研究室でも買えるものではなく、また回路図などを公開しても誰でも作れるものでもない。装置開発、長期モニタリング、航空機、研究船観測など結果を得る前の先行投資が必要である。一方、研究上の重要拠点（宇宙、海洋、陸上）で多要素観測を同時に行うスーパーサイトの展開も必要であろう。

早急に開発が必要な研究課題としては、水平格子間隔数10 kmの高解像度大気大循環モデルに組み込むためのメソスケール対流システムのパラメーター化、雲底付近での雲凝結核から雲粒形成過程をきちんと表現する詳細雲モデルの開発、3次元的不いゆる積雲タイプの雲の（形も考慮した）放射特性を計算する放射スキームの開発、雲凝結核・氷晶核、降雪量、雲の3次元分布の全球のかつ組織的な測定、そしてこれらのモデルや新型装置、リモートセンシングデータの検証を行うための大型実験設備の充実である。

強調したいことは、グローバルでかつ長期的な予測を可能にする数値モデルの作成は確かに重要かつ必要であるが、我々が確認や理解できていない現象が数多くあり、新たな科学研究の展望は、地道な観測、実験や解析を通じてしか得られないということである。

本節のおわりに、以前から時々話題になる人工降雨実験について触れておくと、その基礎となる研究がまだまだ不十分で不用意に行うことには批判的な見解をもつ気象専門家が多い。降雨を成功させたりコントロールしたりすることが仮にできても、その影響については極めて慎重であるべきであろう。

4.3 大気境界層—地表の交換過程の研究

大気の最下層、いわゆる大気境界層とりわけ陸面での境界過程の研究は、長らく1950年代に提唱されたモニン・オブコフの相似則に基礎を置いてきた。この相似則に基づく水平一様地表面の理論・フラックスの推定方法、乱流計測による渦相関法をはじめとする観測手法は80年代にはほぼ確立した。このころから、非一様・非定常・複雑地形をキーワードとした研究が行われるようになった。近年、観測面では、全球エネルギー・水循環研究計画（GEWEX: Global Energy Water and Experiment）、アジアではGAME（GEWEX for Asian Monsoon Experiment）やFLUXNET（flux measurement netのロゴ）などのプロジェクト研究によるデータの蓄積、リモートセン

シング、航空機の利用に関する研究が行われ成果が出ている。

このような研究の流れの中で、重要な課題がいくつか浮かび上がっている。まず、非一様域や複雑地形で、どのように代表性のあるフラックスを評価するかということがある。この問題が中心課題となってからすでに20年程度たつが、いまだに試行錯誤を繰り返している状況である。また、雲を形成するような湿潤な境界層の研究はやっと始まったところである。自由大気と境界層間でのエネルギー、水、物質の交換過程を雲の形成と絡めて理解する必要がある。一方、すでに解決済みと考えられていた水平一様な地表面でも、少なくとも二つの重要な問題が指摘されている。一つは、地表面熱収支が閉じない問題である。これは特に1990年代後半から顕在化してきた。背景には熱フラックスの各項を独立に測定できるようになったこと、それぞれの測定精度が向上したことがある。もう一つの問題は、湿度変動などにモニン・オブコフの相似則に従わない観測結果が報告されるようになったことである。これら二つの問題は見かけ上水平一様な地表面でも、非一様な組織的構造が存在していることを暗示している。しかし、それではこの組織的構造を実用的にどのように取り扱えばよいかということはまだわかっていない。このように問題点は明らかになってきたが、その取り扱いに苦慮しているのが現状であろう。

さらに近年の動向として、ほかの分野と同様に、より複雑なシステムとしての研究が行われるようになってきたことが挙げられる。大気境界層はわれわれ人間が実際に生活している場であるだけに、気象学の中でも特に学際性が強いことが大きな特徴となっている。生物、特に植生や人間活動など従来は気象学とは切り離されて考えられてきた要素も取り込まれようとしている。工学、農学、林学、生態学、雪氷学、水文学、地理学さらには社会科学などの関連研究分野との協力や情報交換がますます重要となるであろう。同時にモデル（あるいは理論）と観測といった、同じ研究対象でも異なる手法を取る研究者間の連携も極めて重要である。

今後も大型プロジェクトによって組織的に得られるデータは、この分野の研究推進に役立つに違いない。その一方で、プロジェクトに組み込みにくい基礎研究、たとえば多くの素過程に関する研究なども着実にやっていくべきである。

4.4 大気環境化学の研究

大気の化学環境に関する研究は、大きく分けると、1) 大気中の化学成分による直接・間接的な生物圏へ影響、および、2) 化学成分やエアロゾルによる、放射の吸収・散乱、雲・降水過程を通じた気候への影響、3) 化学物質の国境を超えた大気の輸送・拡散過程など、三つを柱として行われてきた。特に、1) の代表的なものとして、人為起源の塩素・臭素化合物（いわゆるフロン）による成層圏オゾンの破壊が挙げられ、このことにより紫外線環境の変動による人間の健康や動植物への悪影響が予測された。そして、オゾン層への影響を科学的に評価することで、フロンの規制の国際的な枠組み形成に科学は重要な役割を果たした。この研究は、実験室における基礎化学過程の研究・データの蓄積、大気組成の測定（直接測定またはリモートセンシング）、化学・輸送過程を考慮した数値モデルによる現実大気化学状態の再現と将来予測という要素で構成されている。この点で、大気化学を中心とした大気環境研究は、少なくとも地球科学、化学、生物・生態学などとの学際的な共同研究として進められてきた。研究内容の重点課題は時と共に変化すると考えられるが、大気化学研究の推進には単に古典物理的な知見だけではなく、文字通り、化学的な知見も重要な要素である。

現在、大気化学研究で重要になりつつあるターゲットは、対流圏のオゾンとエアロゾルである。両者は、放射収支を通して直接的に大気の放射熱収支に影響を与えうる。エアロゾルについていえば、局所的な気候や水循環にも影響を及ぼす可能性すらある。これらの化学的物質を生成する前駆気体は大気汚染物質であり、人間活動、特に化石燃料の消費量の増大に伴って今後これらの気体の放出量は増加を続けると予想される。この影響は、国境を超えて100-1000 kmの領域スケールから数1000 kmの地球スケールに及ぶ。一方、都市近郊のように、発生源に近いより狭い局地領域では、これらの成分が特に高濃度になり、生態系に悪影響を及ぼす。例えば、人間の呼吸器系への悪影響、農作物の収穫量の低下、酸性物質降下量増加など、いわゆる大気質の悪化など。

エアロゾルの物理化学過程に関しては、オゾンに比べて未知の要素が多い。エアロゾル濃度の時間・空間変動を理解するためには、その生成過程、変質過程、消失過程、輸送効果を理解する必要がある。エアロゾルは気体と異なり、それを規定する特性（パラメー

ター)として、1) 大きさ、2) 形状、3) 化学組成、4) 混合状態、などがある。またエアロゾルは基本的に単一の化学組成から成る物質ではなく、ほとんどの場合多くの化合物からなる混合物である。エアロゾルを構成する物質として、無機化合物、有機化合物、元素状炭素があるが、エアロゾルの組成が多岐にわたる原因は、エアロゾルの生成時に異なった種類の気体が、さまざまな過程で凝縮するといった積分効果による。また、これらの物質は単独で存在していたり、混合状態で存在したりする。このようなことが、エアロゾルの挙動の理解を極めて複雑・困難にしており、ある意味で研究は停滞していた時期があった。しかし、最近、質量分析技術を中心に、これらの要素を高精度で測定する技術開発が進みつつある。このことにより、エアロゾル研究が大きく進展しつつある。

2次エアロゾル(特に硫酸塩、有機成分)の生成は光化学過程が支配的であることが理解されるようになってきた。すなわち、光化学過程とエアロゾル生成を統合化することにより、エアロゾルの挙動を定量的に理解することができるようになってきている。また湿度変化に伴うエアロゾルの成長過程に関しても、高精度の化学・物理計測技術により、正確・詳細な知見が得られつつある。このように、今後も、リモートセンシングと並び、直接測定によるエアロゾル・雲相互作用の研究がますます重要になってくるであろう。

さらに、研究対象とする領域やその空間スケールにも注意する必要がある。エアロゾルの生成過程を詳細に調べるためには、都市近郊、バイオマス燃焼域など発生源近傍での観測が重要となる。また、これらの領域では、大気環境への影響が最も重要になる。エアロゾルの変質・輸送・消失過程を解明するためには、水平・垂直方向に、より広い領域を対象に研究する必要がある。雲生成過程の研究を行うためには、航空機を用いた多くのパラメーターの直接測定が必要となる。これら一見異なるように見える研究領域は結びついており、このことを意識して研究を進める必要がある。

今後、気象学の重要な研究対象である気候や地球環境の変化に対して、大気化学が貢献できることが多くなってくると予想される。また生態系と大気化学との結びつきも重要な研究課題になってくるだろう。

4.5 中層大気の研究

中層大気の研究は、ティスランドボールやアスマンらによる20世紀始めの成層圏発見以来、未知の現象に対する興味、高層の空間に対する憧れを契機として行

われてきた。とりわけ中層大気内に見られる珍しい現象の謎解きが主眼目であり、準2年周期振動(QBO)、突然昇温、重力波の碎波、オゾンホールなどがその好例である。また、これらの現象に共通する特徴として、下層大気である対流圏界面を境界条件として、中層大気が受動的にその影響を受け、その結果生じた中層大気内部の現象という点が挙げられるであろう。

中層大気国際共同研究計画(MAP, 1982~1985年)の頃から、それまでに蓄積された中層大気領域のデータに基づき、上記諸現象の統計的解析や中層大気循環の長周期変動などの研究が行われ始めたが、それでも中層大気は、たとえばエルニーニョ・南方振動現象(ENSO)など、下層大気や海洋の影響を受ける受動的な領域に過ぎなかった。太陽地球系エネルギー国際共同研究計画(1990~1995年)の中に中層大気上下結合という課題があったが、これも、中層大気と上下大気の相互作用というよりは中層大気の下層の対流圏から影響を受け、さらに中層大気が上層の超高層大気にいかに影響を与えるかという一方向の議論が大半だったと思われる。

また、数値予報の分野では、対流圏の予報精度を上げるためには、成層圏(中層大気)を加えたモデルを用いることの重要性が夙に認識はされていたが、これは、あくまでも上部境界条件をより高い高度に置くことが、対流圏をうまく表現するために重要であるというような観点からのものであり、やはり中層大気は受動的な存在に過ぎなかった。

その後、1990年代半ば頃から、比較的解明が遅れていた、下層大気(対流圏)と中層大気境界領域、すなわち遷移層と、中層大気と上層大気(超高層大気)の境界領域、すなわちMLT(Mesosphere-Lower Thermosphere)領域に関する研究が活発に行われるようになった。前者は、両大気領域間の物質輸送・物質交換という観点から、後者は、中性大気・電離大気の相互作用、光化学過程の重要性、局所熱力学非平衡、重力波碎波など、この領域特有の複雑な諸過程への興味を中心である。これら境界領域の研究は、そこを通じた上下大気の結合過程の解明にとっても重要である。また、相互作用が重要でありながら、それまで個別に扱わざるを得なかった、力学過程、化学・光化学過程、放射過程を結合し、それらの相互作用を陽に取り入れた研究も行われ始めた。特に大気大循環モデルで、従来の力学過程、放射過程中心のものに、化学・光化学過程を導入したモデルが開発され、例えば、オ

ゾンホールと中層大気大循環の相互作用に関する研究などが可能となった。

同時にこの頃から、中層大気が下層大気に与える影響が本格的に考えられるようになった。すなわち、成層圏力学過程と気候に関わる国際共同研究計画 (SPARC, 1993年～) における方向性、あるいは近年の北極振動 (AO: Arctic Oscillation) などの事例から明らかのように、下層大気 (対流圏) の影響を受けた中層大気、下層大気へのフィードバックが本格的に議論されるようになり、真の意味での中層大気上下結合となったといえるであろう。特に成層圏オゾン変動の、対流圏の気候への影響評価を中心に、この方向性は、今後の気候変動を議論する上で、ますます重要になると思われる。また、各国の現業予報モデルが下部中間圏までを対象領域とするようになってきた現状から、成層圏突然昇温を始めとする中層大気循環の予測可能性の研究も重要である。

加えて上層大気との関係についても、太陽地球系の天気と気候に関わる国際共同研究計画 (CAWSES, 2004～2008年) において、MLT 領域を通した同様のフィードバック過程の研究が計画されている。また、南極昭和基地大型大気レーダー計画 (PANSY) という、南極に、上層大気まで含む大気領域を観測できるレーダーを設置し、他の緯度帯に設置されてきた既存大気レーダーと連携して、地球を縦断する観測網を構築する計画がある。さらに、地表から500 km までの大気領域を統一的に扱う統合大気大循環モデルの開発も進められており、新しく得られる観測事実と数値シミュレーションを有機的に結合させることによって、今後、中層大気の大気全体に対する役割の理解が大きく進むことが期待される。

4.6 惑星大気の研究

惑星気象の研究は、実質的には、米ソの惑星探査を待って、1970年代に展開され始めた。惑星といっても、火星、金星、木星が主な研究対象である。火星探査では1976年のヴァイキング1, 2号、金星探査ではヴェネラ・シリーズと1978年のパイオニア・ヴィーナス、木星探査では1979年のボイジャー1, 2号が重要な情報をもたらした。

3つの惑星のうち、火星は、大気が薄いこと、地球と条件が似ていること等の理由により研究が進んでおり、早い段階から大気大循環の数値シミュレーションが試みられてきた。このシミュレーション的研究によって、火星の大気大循環がある程度再現された後、

最大の問題となっているのが、大砂嵐の再現である。現在でも、この問題は解決されていない。

それに対して、金星の大気は、大変厚い (地表面気圧は92気圧) 上に、濃硫酸の雲で金星全体が覆われているので、観測による大気大循環全体の把握が容易ではない。観測によって発見された顕著な現象としては、スーパー・ローテーションと言われている高速の東西流がある。1970年代を中心にして、このスーパー・ローテーションのメカニズムの理論的研究が活発に試みられた。しかし、観測情報が不十分な段階だったので、シミュレーション的な研究ではなく、原理的な流体力学の研究が中心であった。

木星に関しては、やはり、表面で観測される現象、つまり帯状構造や大赤斑が注目されたが、鉛直構造に関する観測はあまりないまま、興味深い、理論的ないしは数値実験的な研究がいろいろ試みられた。

このように、1970年代前後の時期は、それ自体が面白い、未知の現象の発見により刺激を受けた理論的研究によるメカニズムの探求が活発に行われた時期であった。いろいろ提案されたメカニズムは、それ自身興味深いものであったが、なんといっても観測が少ないために、観測結果によって理論を検証するという所までいかなかった。

その後1980年代から、アメリカでは環境問題に対する関心が盛り上がったせいか、惑星気象研究は下火になってしまった。また、新たに探査機が惑星に行っても、同じような一点観測では、大循環の理論的な研究とかみ合う立体的な情報がなかなか得られないという事情もあった。

しかし、近年、アメリカやヨーロッパで、再び惑星気象研究が活発になってきた。例えば、火星の大気大循環モデルによる研究が活発に行われている。また、日本でも、研究者人口が増えてきたせいか、それなりの数の若手研究者が火星や金星といった惑星気象の理論的、数値シミュレーション的研究に熱心に取り組んでいる。

さらに、重要なことは、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部 (旧宇宙科学研究所) で日本独自の金星探査計画が動き始めたことである。しかも、この2009年に金星到着が予定されている惑星探査機は、雲の観測を中心とした気象衛星であり、スーパー・ローテーションを主要なターゲットとしている。周回飛行でのリモート・センシングにより、金星の大循環の立体構造を明らかにしようという意欲的な探査計画である。

このため、金星を中心として惑星気象研究の機運が、日本でも高まっている。期待されている観測結果とうまくかみ合うような数値実験的、理論的研究を推進すべきであろう。

ローカルの問題は、地球における多様性と地域性の問題に直結し、今後の研究において極めて重要な研究領域と思われる。特に大気と他圏との相互作用が重要になってくるので、もはや地球の研究と考える領域かも知れない。

第5章 気象学の大学院教育と研究者育成

5.1 大学院教育の一般的状況

変革の時代といっても過言ではない今日、気象学の研究・教育をめぐる環境はどのようになっているか。また、どういう問題があるか。かつては、ほとんどの研究者にとって、研究予算の不足が不満、悩みであった。しかし、最近では、相当部分の研究者にとって必ずしも研究費不足は最大の問題ではなくなっているようである、という印象が2002年3月に実施したアンケート結果からうかがえる。その一方、額は少な目でも比較的自由的な基礎研究が可能である状態もよしとする意識もみられる。また、多くの研究者は研究や教育に打ち込むための時間が十分に取れないこと、すなわち、組織上のマンパワー不足への焦りも共通してうかがえる。

研究者の卵、将来の研究者となる学生が順調に育ち、後継者が育っているか。大学院重点化は、大学院生の基礎学力の低下、就職活動に伴う修士課程での研究の実行不足、大学院生の研究の指導教育の下請的性格など多様な問題に関係していると考えられる教員が多い。学部学生への教育についても、例えば、「気象学」という専門教育の土台となる基本的な講義のあり方など、学部教育カリキュラムの問題と共に、初等教育の段階での児童の理科離れの風潮も影響してか気象学を専攻しようとする学生の減少、そして学力の低下などの問題の顕在化がささやかれている。こういう状況の中で、気象庁の附属施設気象大学校は、気象学の専門教育と専門家養成にとって重要な役割を果たしており、その意義は大きいといえる。

5.2 大学院教育の実情と諸課題

前章にて指摘した大学院教育の問題について、教育現場からみて、その問題点をさらに細かく指摘するならば、大学院重点化により、旧帝大など規模の大きな国立の大学を中心として、院生の定員が大幅に増加さ

れた。その結果、大学院入学の最低合格に必要な学力や入学動機が変化し低下もした、とみられている。学力低下の原因は、その他にも、現在の学生世代の人口減少による受験競争の一般的緩和、また勉強離れ、特に理系離れが大きく関係していると考えられる。これらの要因が重なって、気象学分野を含む地球物理関係では、学生の学力低下が指摘されている。

さらに、大学院の定員増により、他分野または他大学からの(関連分野の専門的授業を受けて来なかった)学生を受け入れている事情から、気象の勉学や研究に必要な本来なら学部段階で習得すべき基礎知識や基礎トレーニングが十分でない院生が増加している。院生の増加は、院生の意識も変化させている可能性がある。修士課程修了で就職する人が増して、その就職活動に大変なエネルギーと時間を使うので、修士課程での勉学や研究活動に目立って妨げとなっている。

博士課程終了後の院生の就職問題は深刻である。この数年、気象学分野では、幾つかの関連研究組織(例えば、現海洋研究開発機構の地球環境フロンティア研究センターと地球環境観測フロンティア研究センター)が創設され、若手の研究者を数多く吸収した。このため、大学院重点化後の大気・海洋分野では博士号の新たな取得者の就職問題が当初は比較的深刻ではなかった。しかし、これらの組織・機関の大規模雇用が一段落したために、就職の困難が新たに生じつつある。そして、博士号を取った若手研究者は、PDや個別研究費による一時雇用といった不安定な職にしか行き場がなくなる傾向が強まっている。

5.3 問題の所在と改善に向けて

現状の大学院の教育は、院生個々の関心を深めるための専門教育というより、研究室や研究予算に必要な業績と関係する論文製造のための現場教育になっている面がある。学年が上に行けば行くほど、深く(高く)なると同時に、「広い視野を提供する」という教育構造が本来の高等教育の姿であろう。しかし、そもそも近代科学は専門分化を一つの特徴としており、そのため、学年が上に行くに従って、教育が特殊になっていくというのは、ある程度やむをえないことであろう。その点、学部教育は大学院と比べて、まだ幅を有する可能性があり、大学院よりもパースペクティブを提供するという本来の高等教育らしい部分がある。

上に述べたように、ほとんどの大学院は、学生のレベル低下の問題、研究職への就職難の問題などを抱えており、抜本的な対策が必要であろう。そうした対策

を考える場合に、大学どうし（各大学の大学院間）の協力という要素を取り入れることが効果的である可能性がある。すなわち、各大学で特定のテーマに関する特殊教育、または現場教育が行われている実情の短所、欠点を逆に長所として生かす工夫として、各大学の教員が協力して、院生の基礎学力と総合能力の向上を図る協同教育することも有効であるかも知れない。その一つの形は、全国の気象学専攻の院生を共通の場で教育を行う仕組みを構築する。それは単なる夏季学校のような季節行事としてでなく、集中セミナーのような授業を年に何度も実施するとか、または、いわゆる1か月程度の短期の内地留学制度を充実し、気象学という一分野の中であるとしても専門テーマとしてはかなり違う全国の色々な大学の教員に院生が直に接する機会を大幅に増やすとか、こうした教育を実施するには、競争的関係が重視される大学が表に立つより、日本気象学会のような共通基盤の確立している組織が表に立つ方が適当であるかも知れない。いずれにせよ、大学院の特殊化や現場教育化の弊害を乗り越える実験的方策が必要である。

第6章 提言として

締めくくるにあたり、我が国の気象学とその関連分野の研究と教育に関する本報告のうち、特に緊急の課題に対する提言は次のとおりである。

- 1) 地球温暖化を予測するための継続的基幹研究拠点の設置
- 2) 集中豪雨の予報精度を上げる研究の強化
- 3) 国境を超えた大気汚染物質の長距離輸送・拡散の研究
- 4) 局地気象や都市のヒートアイランド現象の研究
- 5) 地球環境の地上観測網と人工衛星観測の連携と拡充
- 6) 大気観測の専用航空機の確保
- 7) 気象学と関連分野の基盤を深化させる研究の充実
- 8) 研究後継者の育成を推進するための専門教育の強化

これらは、気象学の長い歴史を振り返って見たとき、極めて現代的な課題であるということに気付かされる。すなわち、特に、1) - 4) の課題は、人間活動の影響で自然を極めて大きく変質させられて生じる現象である。これほど大規模で深刻な影響を自然に及ぼすことは100年前には考えられなかったことで、そういう意味で現代的な問題である。これらに対しては、個々

の立場と同時に、全国的な規模での協力的、且つ、統括的な取り組みが必要である。

おわりに

気象学は、古代ギリシャ時代から大気の光学現象など素朴な自然への疑問から始まった。今でもそういう現象を気象学の問題として関心を持つ人が多いであろうが、現今の気象学は、社会的に責任を帯びた種々の緊急問題に全力で取り組む必要がある時代に立っていることを我々は深く自覚しなければならない。

本報告書を作成するにあたり、気象学を取り巻く環境を改めて見直した次第であるが、そこには急速な社会の変化に必ずしも十分に対応しているとはいえない所が少なからず見い出される。それと同時に、残すべきものを失いつつある場合もある。こうした現状に対して、問題の所在を示すとともに、具体的な期待と提案を示した。

また、この報告をまとめるに当たっては、日本学術会議の専門委員会としての役割を果たすべく、日本における気象学とその関連分野、さらには周辺分野まで広く視野に入れて検討するよう努めた。ただ、海洋科学や陸水科学のような気象や気候と密接に関係している研究分野について、十分な検討が行き届かず、本報告でほとんど言及できなかった点は今後の課題としたい。

報告の終わりに当たり、2002年3月に実施したアンケートに回答を寄せて下さった多くの関係者や、(社)日本気象学会の春秋の大会に合せて行った本報告関係のシンポジウム等に研究者をはじめ行政担当の関係者の方々が参加し、また、話題の報告者にもなって下さり、熱心に意見を交換して下さいたことに対し、委員会一同ここに改めて深く感謝の意を表します。

資料1：気象学に関連する大型研究プロジェクト等

最近では、基本的に個々の研究者や研究機関を対象として多額の研究費が投資される傾向が見られ、あたかも平地に突出した山があちこちに盛り上がっている様子を呈している。それにも拘わらずというべきか、個々のプロジェクトをこなすことに専心している故にというべきか、個々のプロジェクト間の連携が少ないように感じられ、また意外にも相互のプロジェクトの存在を知らないことすらある。そこで、第18期(平成12~15年度)の期間に実施されている大型研究プロジェクトについて、調べられる範囲で研究課題と内容についてまとめた。5年あるいは10年を経た後に、これらのプ

プロジェクトがどう評価されているかは大変興味深く、またそのような追跡調査も是非行いたいものである。

1.1 人・自然・地球共生プロジェクト（文部科学省 研究開発局海洋地球課地球環境科学技術推進室）

温暖化予測「日本モデル」ミッション：気候変動に関する政府間パネル（IPCC）における第4次評価報告書に寄与できる精度の高い温暖化予測を目指した「日本モデル」を開発する。

水循環変動予測ミッション：日本を中心としたアジア・モンスーン地域における陸水循環過程の解明に向け、各研究機関が共同で高解像度の水循環モデルを開発することにより、将来の水資源・水災害の予測を目指す。

共通基盤技術：大気、海洋、陸域における観測データの収集及びデータベース化を進めるとともに、観測データの4次元同化システムの高度化を図り、地球温暖化予測や水循環変動予測等の精度向上並びにその検証に必要となる高品質の初期値化データセットと再解析統合データセットを作成する。

以下は、研究開発課題名、主管研究実施機関名、研究代表者名である（所属機関名が変更になったものもあるが、以下では採択時の機関名・所属名である）。

1) 地球温暖化「日本モデル」ミッション

- a. 大気海洋結合モデルの高解像度化(住 明正/東大CCSR)
- b. 大気海洋結合モデルの高解像度化(丸山康樹/電力中央研)
- c. 地球温暖化予測統合モデルの開発(松野太郎/地球フロンティア研究システム)
- d. 諸物理過程のパラメタリゼーションの高度化(安岡善文/東大生産研)
- e. 諸物理過程のパラメタリゼーションの高度化(日比谷紀之/東大理工)
- f. 高精度・高分解能気候モデルの開発(松尾敬世/地球科学技術総合推進機構/気象研)

2) 水循環変動予測ミッション

- a. 広域水循環予測及び対策技術の高度化(植田洋匡/三菱重工工業株式会社/京都大学)
- b. 水資源予測モデルの開発(山梨大学/竹内邦良)
- c. インドシナ半島における水環境の化学汚染実態の解明と汚染除去技術の開発(鈴木 聡/愛媛大学)
- d. アジア・モンスーン地域における水資源の安全

性に関わるリスクマネジメントシステムの構築(大村達夫/東北大院工)

3) 共通基盤技術

- a. 四次元同化システムの高度化及びデータセットの整備(淡路敏之/海洋科学技術センター/地球フロンティア研究システム)

1.2 戦略的創造研究推進事業（科学技術振興事業団）

戦略的創造研究推進事業は、第2期科学技術基本計画の重点4分野を中心に、国の科学技術政策や社会的・経済的ニーズを踏まえ、国が定めた戦略目標の達成に向けた基礎的研究を推進する。

- a. 大気-陸域相互作用のモデル化と衛星観測手法の開発(小池俊雄/東大院工)
- b. 森林衰退に係わる大気汚染物質の計測、動態、制御(佐久川 弘/広島大総合科学)
- c. 東アジアにおける酸性物質及びオゾンの生成と沈着に関する観測と環境影響評価(秋元 肇/地球フロンティア研究センター)
- d. アイソトポマーの計測による環境物質の起源推定(吉田高弘/東工大総合理工学)
- e. アジア域の広域大気汚染による大気粒子環境の変調(中島映至/東大CCSR)
- f. 化学的摂動法による大気反応機構解明(梶井克純/東大先端研)
- g. メソ対流系の構造と発生・発達メカニズムの解明(吉崎正憲/気象庁気象研)
- h. 海洋大気エアロゾル組成の変動と影響予測(植松光夫/東大海洋研)
- i. 熱帯林の林冠における生態圏-気圏相互作用のメカニズムの解明(中静 透/総合地球研)
- j. オホーツク海氷の実態と気候システムにおける役割の解明(若土正暁/北大低温研)
- k. 超伝導受信器を用いたオゾン等の大気微量分子の高度分布測定装置の開発(福井康雄/名大院理)
- l. 衛星観測による植物生産量推定手法の開発(本多嘉明/千葉大環境リモートセンター)
- m. 温暖化ガスにかかわる永久凍土攪乱の抑制技術(福田正己/北大低温研)
- n. 乾燥地植林による炭素固定システムの構築(山田興一/信州大繊維)
- o. 人間活動を考慮した世界水循環水資源モデル(沖 大幹/総合地球研/東大生産研)

- p. 階層的モデリングによる広域水循環予測 (木本昌秀/東大 CCSR)
- q. 北東アジア植生変遷域の水循環と生物・大気圏の総後作用の解明 (杉田倫明/筑波大地球科学)
- r. 湿潤・乾燥大気境界層の降水システムに与える影響の解明と降水予測精の向上 (中村健治/名大地球水循環センター)
- s. 北方林地帯における水循環特性と植物生態生理のパラメータ化 (太田岳史/名大院生命農学)
- t. 衛星による高精度高分解能全球降水マップの作成 (岡本謙一/大阪府立大院工)
- u. 都市生態圏一大気圏一水圏における水・エネルギー交換過程 (神田 学/東工大院理工学)

1.3 科学技術振興調整費

この予算は、総合科学技術会議の方針に沿って科学技術の振興に必要な重要事項の総合推進調整を行うための経費であり、各府省の施策の先鞭となるもの、各府省の施策では対応できていない境界的なもの、複数機関の協力により相乗効果が期待されるもの、機動的に取り組むべきものなどで、政府誘導効果が高い場合に活用される。

- a. GPS 気象学：GPS 水蒸気情報システムの構築と気象学・測地学・水文学応用に関する研究 (平成9～13年度) (内藤勲夫/国立天文台)
- b. 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12～14年度) (三上正男/気象庁気象研)
- c. 21世紀のアジアの水資源変動予測 (平成13～15年度) (鬼頭昭雄/気象庁気象研)
- d. 高度質量分析技術による大気環境計測器開発 (平成13～15年度) (近藤 豊/東大先端研)
- e. アジア太平洋地域の大気環境の改善 (平成13～15年度) (指宿堯嗣/産業技術研)
- f. 高精度の地球変動予測のための並列ソフトウェア開発に関する研究 (平成13～15年度) (杉 正人, 谷貝 勇/気象庁気象研)
- g. 精密衛星測位による地球環境監視技術の開発 (平成14～16年度) (津田敏隆/京大宙空電波研)
- h. 地球水循環インフォマティクスの確立 (平成15～17年度) (小池俊雄/東大工)

1.4 21世紀 COE プログラム (文部科学省研究拠点形成費補助金)

平成14年度に始まった文部科学省の新規事業。我が国の大学が世界のトップレベルの大学と伍して、教育

及び研究水準の向上や世界をリードする創造的人材を育成していくために、競争的環境を醸成し、学問分野ごとに世界的な研究教育拠点の形成を重点的に支援することにより、活力に富み、国際競争力のある世界最高水準の大学作りを推進することを目的とする。

- a. 生態地球圏システム劇変の予測と回避
北大・院地球環境科学研究科 (拠点リーダー/池田元美)
- b. 環日本海域の環境計測と長期・短期変動予測
金沢大・自然科学研究科 (拠点リーダー/早川和一)
- c. 多圏地球システムの進化と変動の予測可能性
東大・理学系研究科 (拠点リーダー/山形俊男)
- d. 太陽・地球・生命圏相互作用系の変動学
名大・環境学研究科 (拠点リーダー/安成哲三)
- e. 活地球圏の変動解明
京大・理学研究科 (拠点リーダー/余田成男)
- f. 先端地球科学技術による地球の未来像創出
東北大・理学研究科 (拠点リーダー/大谷栄治)
- g. 惑星学の起源と進化
神戸大・自然科学研究科 (拠点リーダー/向井正)

1.5 科学研究費補助金特定領域研究

- a. 対流圏化学グローバルダイナミクス (平成10～12年度) (田中正之/東北工業大)
- b. 極域氷床深層コア解析による地球環境変動の復元研究 (平成10～12年度) (渡辺興亜/国立極地研)
- c. アジアモンスーン地域におけるエネルギー・水循環 (平成11～14年度) (安成哲三/筑波大)
- d. 東アジアにおけるエアロゾルの大気環境インパクト (平成13～17年度) (笠原三紀夫/京大)
- e. 縁辺海の海況予報のための海洋環境モニタリングの研究 (平成11～14年度) (平 啓介/東大・海洋研)
- f. 地球環境問題の解決を目指したグローバルな観点に立った石炭利用技術の開発 (平成11～14年度) (三浦孝一/京大)
- g. 北極域における気候・環境変動の研究 (平成11～16年度) (藤井理行/国立極地研)
- h. 大気化学・燃焼化学における新規ラジカル連鎖反応 (平成13～15年度) (鷲田伸明/京大)
- i. 成層圏力学過程とオゾンの変動およびその気候への影響 (平成11～14年度) (宮原三郎/九大)

- j. 赤道大気上下結合(平成13~18年度)(深尾昌一郎/京大宙空電波研:現生存圏研)
- 1.6 科学研究費補助金学術創成研究費
- a. 海洋生命系のダイナミクス(平成12~16年度)(塚本勝巳/東大・海洋研)
- b. 極地氷床における物理過程の解明とそれに基づく気候・環境変動史の高分解能解析(平成14~18年度)(本堂武夫/北大低温研)

資料2:略語(ACRONYM)リスト

ABC: Atmospheric Brown Cloud 大気褐色雲計画
 ADEOS: Advanced Earth Observing Satellite 地球観測 プラットホーム技術衛星「みどり」
 AO: Arctic Oscillation 北極振動
 CAUSES: Climate and Weather of the Sun-Earth System 太陽地球系の天気と気候に関わる国際共同研究計画
 ENSO: El Nino-Southern Oscillation エルニーニョ-南方振動
 ENVISAT: Environmental Satellite 環境観測衛星
 EOS: Earth Observing System 地球観測計画
 GCOM: Global Change Observing Mission 地球変動観測計画
 GEOS: Global Earth Observation System of Systems 全地球観測計画
 GOSAT: Greenhouse gases Observing Satellite 温室効果ガス観測衛星
 GPM: Global Precipitation Measurement 全球降水観測計画
 IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change 気候変動に関する政府間パネル
 JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency 宇宙航空研究開発機構
 MAP: Middle Atmosphere Program 中層大気研究計画
 MTSAT: Multi-functional Transport Satellite 運輸多目的衛星
 PANSY: Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar 南極中層大気観測レーダー計画
 QBO: Quasi Biennial Oscillation 準2年周期振動
 SPARC: Stratospheric Processes and their Role in Climate 成層圏過程とその気候影響計画
 THORPEX: The Observational Research and Predictability EXperiment 観測システム研究・予

測可能性実験計画(本項目追加)

UNEP: United Nations Environment Programme 国連環境計画
 WCRP: World Climate Research Programme 世界気候研究計画
 WMO: World Meteorological Organization 世界気象機関

参考文献

松田佳久, 近藤裕昭, 神沢 博, 林 祥介, 高谷康太郎, 2003a: シンポジウム「21世紀の大学・研究所の将来像」の報告(その1), 天気, 50, 845-849.
 松田佳久, 近藤裕昭, 神沢 博, 林 祥介, 高谷康太郎, 2003b: シンポジウム「21世紀の大学・研究所の将来像」の報告(その2), 天気, 50, 935-942.
 松田佳久, 近藤裕昭, 神沢 博, 林 祥介, 高谷康太郎, 2004: シンポジウム「21世紀の大学・研究所の将来像」の報告(その3), 天気, 51, 47-53.
 中島映至, 2003: 2002年気象研連アンケートに関する報告, 天気, 50, 861-869.
 上記参考文献は <http://www.s-ws.net/tenki/> で閲覧可能
 (報告本文以上; 「天気」掲載のために若干体裁の変更を行いました.)

補遺

本報告の本体は公開されているが, 本委員会で議論した他の問題も少なくないので, その一部を補遺という形でここに示しておく.

補遺第1章 評価について

最近では「評価」の言葉に触れない日はない, といえるほど評価, 評価と喧しい. それでは「評価とは何か」と考えると, 各人で異なるイメージがあるというのが実情ではなからうか. すなわち, 「万人を納得させる評価方法やその基準」というものは無さそうである. 要するに, 誰にとっても, 評価とは結局「自分の存在価値を認めてくれるような評価が良い評価」なのであり, 「自分の存在を否定するような評価は良くない評価」なのである. 評価はそういう自己主張の競合行為である. 従って, 評価の危うさに振り回されることなく, 如何なる評価をも蹴散らすほどに自分を強く賢くすることが先決で肝要である.

実際, 社会に広く浸透している評価の有り様やその基準は, 時代によって変遷してきたし, 今も変わりつ

つある。評価は、そもそも基準が基準となりえず、普遍的でなく一時一所にうつろう、一人一人の自分中心の価値観の表れに過ぎない。そういう意味から、この補遺においては、評価の尤もらしい「正しい」基準を示すのではなく、現実に行われている評価に対する印象を述べるにとどめる。これが、評価に関する議論を少しでも豊かにし、評価という一つの人間行為の潜在的意義を深めるきっかけになることを望むのみである。

1.1 1人の若手の視座からみた評価の問題

評価というものは考えれば考えるほど難しい。第1に、次に示すように世の中には実に様々な形の「評価」が存在している。第2に、目的、方法によって同じ対象者への評価が大きく変わり得る。誰もが認める最良の評価方法はそもそも存在しない、評価のあり方を議論することがひとつの学問になり得るほどで、「大学評価学会」なる学会が2004年に設立されたほどである。ここでは評価に対して比較的若い研究者の立場から、雑感や要望を記す。

1) どのような評価があるか

大学や研究所といった組織に対する評価に関しては自己評価、様々な外部評価（大学評価・学位授与機構、大学基準協会など）が行われている。広い意味では受験ランキング・大学ランキングといった類も評価の一例であろう。個人に対する評価は、業績評価、給与の査定、学生による授業評価などが考えられる。このほかにも競争的研究資金の採択状況、各種の賞の受賞状況なども評価として用いられている。

2) アンケートの結果から

2002年の気象研連アンケートからは、現状として比較的穏やかな評価が行われていて、それに対する不満はあまり強くないといった様子がうかがわれた。評価の必要性は多くが認めている。個別の意見では評価基準の明確化、公開を求めるものが目立った。また、評価が合理的かつ簡便であることの重要性も指摘されている。これは後に記す評価疲れ、時間のかかりすぎに関わることである。

3) 東北大学理学研究科の例

東北大学理学研究科では1999年に独自の外部評価を行った。さらに2001年度には大学評価・学位授与機構による最初の理学系研究に対する評価対象となった。これに対しては以下のような問題点が指摘され、地球物理研連でも議論されている（花輪、海の研究、11巻3号。）① 評価は論文数など少数の数値化可能な尺度

でされているらしい。② 各分野で評価基準の文言は同じなのに、出てきた結果は大きな差がある。③ グローバルスタンダードになっていない。

個人に関しては、7年ほど前から授業評価が行われるようになったが、給与、校費配分に結びつくような評価は行われていない。しかし、法人化に伴い変化する可能性がある。

4) 旧地球観測フロンティア研究システムの例

年に1度、自己申告の研究業績評価表に基づき所属長が個人の評価をしている。この評価は給与、処遇に反映される形になっている。研究推進スタッフが研究員に、あるいは逆に研究員が研究推進スタッフに身分変更されることもある。観測やインフラ整備など論文、研究発表に直接結びつきにくい仕事も記述できる。また、当初は評価項目になっていなかったアウトリーチ活動等も最近は記述できるようになった。しかし、それらをどのように評価するかが難しい問題である。

5) 評価疲れ—効率的な評価システムの確立を—

様々な評価機関が評価を行うことは、評価が恣意的にならないために必要なことである。しかし、高い立場から評価できる一部の研究者はあちこちの評価に借り出される。評価を受ける側は、評価する側が既存の評価資料・データを十分生かしていないため、同類の微妙に形式や項目が違う評価資料を何度も作成させられる。結局、評価に忙殺され、肝心の研究・教育に充てる時間がなくなることになる。各研究者はきちんとした業績のデータベースのようなものを作るのみとして、各評価機関はそれに基づいて独自の基準で評価できるようなシステムを確立するべきである。

6) 気象学における問題

気象学は総合科学技術会議のイニシアティブの1つに地球温暖化研究が取り上げられるなど、一定の評価を受けている。しかし、評価基準としては産業への影響といった尺度が重視されているように見受けられる。気象学に限らず理学的なあるいは地球科学的な視点に対する評価は厳しいものがある。産業ベースあるいは工学的な基準に乗せられている。たとえば、最近、特許の取得も重要な評価項目になっているが、気象学にとっては扱いにくい項目である。また、論文数で評価される場合でも、気象学の論文は一般に時間をかけた十分な議論を求められ、数多くの論文を書きやすい分野ではない。異分野との競合になった際に不利になる可能性がある。

7) 最後に

評価結果がどのように使われるのかも気になる問題である。外部評価で高い評価を得た大学の研究者が、任期制ポストであることを理由に再任を拒否されるといった「事件」も伝え聞く。評価の恣意性を排除するためには点数化することが必要であろうが、そのためには詳細な規定が必要となり、泥沼化する恐れもある。そもそも点数化になじまない評価項目もある。民間企業は成果主義という形で評価の厳格化を研究機関や大学よりもはるかに早く導入しているが、かえって人間関係を阻害したり士気を低下させてしまった例も多いらしい。評価の目的をはっきりとさせて、評価する側とされる側の合意の下に行われること、評価の透明性、評価に対する抗弁権、評価者に対する評価のシステムの確立、評価の公表方法といったことが重要である。いずれにせよ、研究・教育界に対する大衆社会的な意味での評価の歴史が日本では浅く、常により良いシステムにしていく努力、試行錯誤をしていかなければならない。

1.2 評価の種々の視点という問題

1) 評価の前提について

人の評価は、誰が、誰を、何の目的で、何を、どのように、といった面が入口になる。そして、その背景に次のような保証があるかどうかも重要であろう。

① 評価する側に、評価する能力や評価過程の公平性があるかどうか、

② 評価される側に、評価結果に公平に異義を申し立てられるかどうか、

③ 評価の目的と利益は、評価する側だけでなく評価を受ける側にも存在するか。

2) 評価結果への対応

評価の結果を生かす対応も多様である。よくある形は、昇給や昇格、表彰などである。これらは個人の能力向上や成果を引き出すのに効果があるとされている。しかし、そのような対応がなくても、自己達成、自己実現といった面での満足感を重視する人達も少なくない。このような視点からも評価は生かされるべきであろう。

3) 色々な評価項目

a. 質か、それとも量か

<論文数> 最近では、研究者や教員などの業績評価の基礎データとして論文数を重視する傾向が顕著である。このことの妥当性には問題がないわけではないだろう。しかし、評価する側に質を評価する能力がない

場合には、おおむね数を重んじるしかないのが実態であるようだ。多人数連名の論文の増加傾向は、一つには共著者の単なる論文数稼ぎが背景になっているのではないかという皮肉がなくもない。最近では、単著論文がほとんど見られなくなったのは大きな問題ではないか。かつては多少の協力程度では、連名になることを特に望まなかった。しかし、数で評価される世となれば、そうは言ってもおれず、寄与という名目の下に、さもしくなるのも人情といえようか。

<引用数> この数字の意味が何を意味するかについては色々議論があるだろう。それはさておき、最近では論文数とともに評価の客観的数字として、重視されるようになってきた。そのため、読者数の多い科学雑誌がもてはやされ、数多く引用されることを特別にありがたがる傾向が増している。重要なことは、その引用のされ方である。本物の目利きに、たとえ少数でも目にとまるかどうかが大事なのである。

<学生数> 大学や教員の評価項目の一つとして、学生数や定員達成率というものが数値目標の一つとして重視されている。この評価については、教員数、教育の質、学生の学力など広範な問題に関係が及ぶと思われる。後述の第2章の議論を参照されたし。

b. 部分か、それとも全体か

<評価の特化> この人はこれをやらせれば天下無敵というような評価視点がある。つまり評価の特化である。これは目的に依存するが、評価自体は比較的に明解である。最近では人間を部分化して見るという思想が進みつつあるので、今後も、この種の評価は増大するだろう。しかしながら、気象学は、多様な研究能力が期待される分野なので、評価を余り特化すると研究に発展性が生まれにくい恐れもある。

<総合的> 評価の視点を広げることは、評価が分散する傾向が出てきて、明解でなくなる短所をもつが、現実にはこの形の評価が行われる場合が多いだろう。それは、長所として、特化された評価がもつ誤差をいい意味で補完することになる可能性がある。

c. 過去か、現在か、それとも将来か

<業績> その人の過去をみることは、広く行われている評価方法である。すでに済んだことへの評価なので、精度の高い評価方法の一つである。問題は過去と今のつなぎである。

<現状> 過去はどうであってもよい、今がどうかという視点である。分かりやすい評価になるが、目先にとらわれる恐れは大きい。目の前の山は大きく見える

ものである。

〈可能性〉 最も困難な評価の視点であるが、最も重要な視点でもある。評価する側の責任が問われる。しかし、評価のだいたい味が出るころでもある。

d. 客観か、それとも主観か

〈客観〉 数値化できることが客観性を保証すると考え、評価を数値化するものである。現在、この手の客観化は進んでいると思われる。しかし、数値化できる評価の視点は必ずしも多くなく、無理な数値化をしてしまう恐れもある。また、評価というものは、そもそもが主観的でしかなく客観性はないので、数値化したからといって客観性があることと関係ない。言葉のマジックにはまらないよう注意すべきである。

〈主観〉 主観的評価に妥当性があるのは、評価側の能力がある時のみである。ただ、現実には主観的評価は偏りが大きく、お手盛りや内輪ぼめに陥りがちであるので、評価過程の公開性や公平性を工夫することがこの偏りを是正するに少しは役立つだろう。

e. 専門か、それとも専門外か

〈専門家(くろうと)〉 専門の見知からの評価は特に重要である。従って、専門分野の優れた人の主観的評価に委任するのは効果的である。しかし、d. で指摘した偏りという弊害がしばしば起こる。

〈専門外(しろと)〉 専門的な偏りがなければ公平な立場で評価できるよさがあるが、理解不足の弊害があり、評価の精度に大きな問題が生じる。

4) 最後に

評価は、しない、されない、という訳にはいかない問題である。そうである以上、単に優劣をつけるための評価をするのでなく、人間を生かすための評価にこそ知恵と工夫の出どころがある。日本語の「評価する」がそういう意味で使われているのは、適切である。各人、各界でのご努力に期待したい。

補遺第2章 大学院教育の課題について

大学院教育の実状を報告し、それを分析することにより、その課題を検討したい。

2.1 現状

大学院重点化後の大学院の実状については、既に多くの方が論じているが、一応ここで整理しておきたい。

大学院重点化により、旧帝大など大きな国立大学を中心として、院生の定員が大幅に増加した。そのため、院生の学力やモチベーションが大幅に低下した、と言われている。しかし、学力低下の原因はその他に

もある。学生の世代の人口減少による受験競争の緩和、一般的な勉強離れ、理系(特に数・物)離れも大きく作用している。以上の要因が重なることによって、地球物理関係では、学生の顕著な学力低下が指摘されている。しかし、大気(気象)分野は地球物理系の中では人気があり、相対的にはまだ良い方だとも言える。

この学力低下により、大学院で学部より高度な教育が困難になってきている。それには、大学院の定員増により、他分野からの学生を歓迎せざるを得ないことも関係している。学部より高度な教育が出来ない大学院というのは、奇妙なものである。

また、院生の増加により院生の意識も変化してきている。モラトリウム的な意識の学生が増大し、また修士修了で就職する人が増大してきている。最近の就職活動には大変なエネルギーを要するため、修士課程の途中で勉学・研究活動が中断されてしまう。周囲で就職活動する人が増大することは、博士課程に進学予定の人の勉学・研究にも良い影響を与えていない。上に述べた、学力低下問題と相俟って、修士課程は教育機関として空洞化しつつある。院生をうまく研究させた大学先生にとっては、「ものになる」院生の比率が急激に低下してしまった訳だ。レベルの低下した院生に対する教員側のよく見られる対応策は、より細分化した研究の断片的作業をあてがうことである。レベルの低い所に安定する方向に行っている、ということだろうか。

有力大学の大学院の定員が大幅に増え、その院試が簡単になったため、中小の大学の学部出身の学生が有力大学へ入学する顕著な傾向がある。中小の大学の先生にとっては、せっかく学部で教育した学生が抜けてしまい、その大学院の院生がいなくなったりして、大変困った事態になっている。

さらに、博士課程終了後の就職問題は深刻になりつつある。近年、大気や海洋分野では旧地球フロンティア研究システムと旧地球観測フロンティア研究システムが200人規模の研究者を吸収した。このように多くの過剰人口がいたということ自身、驚きであるが、このため、大学院重点化後の大気・海洋分野では博士の失業問題がそれほど顕在化しなかった。しかし、これらの機関の採用が一段落したために、急速にこの問題が顕在化しつつある。周知のように、大量生産された博士の行き場所は、学振やCOEのPD、さらには研究費による雇用といった一時的な不安定な職である。一回目のPDが終わり、次の一時的なポストに着くのも困

難な人が増えつつある。つまり、毎年大量に生産される博士を、従来のパーマネント・ポストでは無論のこと、一時的なポストによっても処遇するのは困難なわけである。

2.2 困難な将来

以上、学力低下問題と就職問題を中心として、大学院の現状の報告を述べたが、これらはほとんどの教員の感想と一致する所であり、既に「当たり前のこと」になってしまった感がある。また、昨年度、国立大学は法人化した。急激な変化は少なくとも表面的には起こっていない。しかし、以下に述べるように事態が深刻化している兆候もあるので、それをふまえて、将来の大学(院)教育を考えてみたい。

理系離れと言われているが、その中でも基礎から応用へのシフトは時代の潮流であり、理学離れが顕著になっており、学力低下どころか学生の定員割れの兆候や現実がみられる。学部段階でもそうであり、大学により進行状況は異なるだろうが、理学部は既に二流学部になったか、なりつつある。大学院に関しては、最有力大学でも(少なくとも入試の敷居では)一流とも言えないであろう。いくら理学離れと言っても、このような結果になってしまったのには理由がある。日本の理学系の大学は逆ピラミッド型の構造をしており、レベルが高いとされている大学ほど院生や教員の定員数が多い。そのため、「全体の平均は二流でもピラミッドの上の方は一流」という状態(これが普通である)にはならないで、一挙に最有力大学も二流ということになってしまった。このことは教員に対しても言えて、最有力大学も単に細分化した研究で論文を量産している研究者がたくさんいる大学というだけになってしまった。従って、ピラミッド型構造の上の方が本来果たすべき役割をになう場所がなくなってしまった。つまり、全体に対する頭脳的な役割(オピニオン・リーダー的、司令塔的役割)、断片的研究の体系化、有閑インテリの放牧といった高等な機能を果たす大学は、逆ピラミッド型構造の下では、存在しがたいのである。

また、博士課程を終了した院生の就職問題はますます深刻化しつつある。法人化した大学の財政状況の悪化により、(大学生世代の人口減少を見越した私立大学と同様、)教員退職者の不補充が余裕のない大学から始まりつつある。「団塊の世代が定年退職すると、そのあとポストが空き、定職に就ける」と言って、自分の研究室のODやPDを励ましている教授がいるらしいが、空いたポストがどうなるかは何とも言えなくなっ

てきた。つまり、大学などのポストに就ける人の絶対数がかなり減少するかもしれない。

有力国立大学などの気象分野を含む理学系の大学院は、それぞれの専門の研究者の養成を目指している。しかし、現状においてはほとんどの人が研究者の定職に就けないでいる。現在たまたまそうになっているのではなく、研究者の定職ポストに比べて、大学院の学生定員があまりにも多すぎるのである。とすると、専門研究職以外の幅広い分野へ院生を就職させなくてはならないが、それには現在の理学系の大学院の教育は狭すぎる。

そもそも、大学院は学部と比して何がその教育の特徴なのだろうか。院生には必ず指導教員が決まっている。その研究室に配属になっていることだろう。そして、その研究室で修士論文、博士論文その他の論文を書くことであろう。従って、専門細分化された研究テーマで研究し論文を製造することに馴らすのが、大学院の特徴的な教育といえ教育ということになる。もしこれを教育と解するならば、それは高等教育でも、特殊教育でもなく、むしろ現場教育というべきであろう。つまり、大学は研究現場でもあるのだから、そこでの現場教育が大学院教育の特徴となっているわけである。

従って、現場教育を中心とした大学院教育には、(専門研究者養成以外の)教育としての付加価値が希薄である。それどころか、学生の視野を狭くしてしまうのが落ちである。従って、社会は大学院教育をほとんど何も評価していない。修士課程の修了者は大目に見てくれるが、博士に対しては否定的である。社会の判断の方が合理的であろう。

しかし、いまさら、理学系の大学院教育を幅広いものにしてみても、どのくらい意味があるか疑問である。理学系の研究職につくのでないならば、始めから他の学部で学んだ方が就職などに関して有利であることは明らかであろう。とすると、現在の理学系の大学院の巨大な定員を正当化するのは困難ということになる。(もしあるとしたら、指導教員が自分の研究に院生を無給で使えること、院終了後も、PD、ODとして一時金で使えることであろう。)しかし、現在の大学院の定員は教員の定員から決まっているものであり、教員一人当たりの院生数はそれほど不当なものではない。ということは、有力国立大学を中心として、理学系の大学院に関係する教員の数が多すぎるということになる。これは研究所のスタッフが自動的に大学院の教

員になるなど、研究と教育の切り分けが行われていないためである。

これは既に他のところで論じたことであるが、日本の（国立）大学では、人事において教育が何も評価されないことから分かる通り、建前は教育を看板に出していても、教育は極めて軽視されている。教育能力を評価されて教員になった人のことをほとんど耳にしない。現在の大学のスタッフにとって、関心のある教育はせいぜい論文製造のための現場教育である。今後、今のような「業績評価」が厳しくなると、余裕がなくなり、この傾向はますます顕著になるだろう。国も研究に金を出しても、教育には金を出したとらない。それどころか、教育と研究が分離されていないため、「傾斜配分」などにより、実質的には教育から重点研究に金が吸い上げられている。従って、大学での教育を再興したいと思うのなら、教育と研究を分離して、教育部門に関しては（断片的研究者ではなく）学識や教育能力のある人を採用し、予算的にも研究費と区別する必要がある。そうでなければ、「基礎研究」と称する実用にならない分野の論文製造に、教育の看板が利用されるだけであろう。

以上、教育の側面から大学院の現状の問題点を述べたが、改善の可能性はあるのだろうか。例えば、博士課程の修了者が余っているのだから、大幅に院生を減らし、昔のように少数精鋭でいけば良さそうだが、これは院生のほしい教員が多いので、実現しそうもない。個別利益の総和でしか動けない大学内部からは改革の動きは出て来ないだろう。かといって、大学病院などと違い、社会との関わりあいも希薄なので、外部からの改革圧力も少ない。従って、制度的には現状のまま推移する可能性が大きい。結局、理学離れ、院終了後の処遇の極端な悪さ、研究の細分化などの効果が相まって、就職口もなく、視野が狭く細分化した研究で満足するレベルの若者しか理学系大学院には残らなくなるであろう。教員の方も、細分化した研究で論文を大量生産することで満足できるレベルの人が残って行くであろう。両者がうまく調和して、理学系の大学院は低いレベルで安定して行くと思われる。しかし、このような組織がいつまで安泰であるか、疑問であるので、やはり、有力大学での教育と研究の切り分け、学部学生、院生の定数の適正な数への是正などの改革が望まれる。（補遺以上）