

地球観測の強化に向けて日本気象学会は何をなすべきか —地球観測のあり方について—

日本気象学会第39—40期学術委員会*

日本気象学会では、理事会の会期ごとに学会の活動として重要と思われるテーマを選び、そのテーマに関する専門家を評議員としてお招きし、意見・提言をいただいている。第39期では第1回評議員会（2017年4月21日開催）において「地球観測の強化に向けて日本気象学会は何をなすべきか」というテーマのもとで議論がおこなわれた。その趣旨としては、観測技術や情報基盤技術の進歩にともなって多様化・大容量化する様々な気象データをいかに社会に還元してゆくのか、次の時代に向けた新たな観測システムをいかに構築するのか、そのために気象学会が果たすべき役割は何かについて議論していただくことであった。評議員会では9名の評議員に出席いただき、大気のみならず海洋分野の研究者さらには情報科学分野からの研究者も含めて、地球観測システムの現状とその観測データの流通や利用に関する問題点、あるいは特に衛星観測についてその合意形成に関わる諸課題についての議論がおこなわれた（その詳細は「天気」2017年11月号の第39期第1回評議員会議事概要を参照されたい）。以下の文章は、評議員会での議論を踏まえ、学術委員会のメンバーである塩谷、早坂、山口、榎本が論点を整理しつつ、問題点をさらに明確化することを目的として取りまとめたものである。本報告書の第1稿は第2回評議員会（2018年4月27日開催）に提示され、そこでのコメント等を踏まえ改訂したものが本稿である。

第1章では、気象学にとって観測がどのような意味合いを持っているのか、オゾンホールを一つの事例として取り上げて、様々な大気観測データが果たした役割について考え、本報告書の狙いについて記す。第2

章では、急速に発展してきた観測技術の高度化や情報科学の進展について概観し、コミュニティの拡大とともに観測計画の規模や実施主体が変遷してきている現状について述べるとともに、国際的に展開される観測計画に対する我が国の立ち位置について考える。第3章では、比較的狭い範囲で短い時間スケールの現象を取り扱う天気予報と防災という観点と、グローバルで比較的長い時間スケールの問題を取り扱う気候研究と環境監視という観点から観測の実情をまとめる。第4章では、観測計画を提案する際にその妥当性をコミュニティの構成員が共通の問題意識を持って事前に評価することの重要性と、具体的な観測評価システムの事例について述べる。第5章では、レーダー観測や衛星観測に代表される遠隔観測において観測量を物理量に変換するリトリバルの重要性や、一貫した過去の大気の状態を推定するため作成される再解析データの重要性について述べ、データをより有効に活用するために必要な道具立てについて考える。第6章では、地球観測データが多岐にわたり、またその容量が膨大になってきている中で、科学者がアカデミックな興味でデータを獲得・解析するだけでなく、取得したデータとそこから得られた科学成果をさらに広く社会に提供してゆくことへの期待を述べる。第7章では、それまでの議論をまとめ、問題点に対する共通認識を確認しながら、気象学会としてそれらの問題に対してどのような取り組みが可能か、今後の展望についてまとめる。

1. 気象学と観測

序章として、オゾンホール発見からそのメカニズム解明、さらにはオゾン破壊物質の全廃にいたった流れを一つの事例として取り上げ、様々な大気観測データが果たした役割について振り返ってみる。その中で大気科学・気象学にとっての大気観測のあり方について考え、本報告書のねらいについて記述する。

* 塩谷 雅人（京大生存圏研究所, shiotani.masato.8a@kyoto-u.ac.jp）、早坂忠裕（東北大学大学院理学研究科）、山口宗彦（気象庁気象研究所）、榎本 剛（京都大学防災研究所）

1.1 気象学にとって観測とは

現在、気象学あるいは大気科学の中心的なテーマの一つは、われわれを取り巻く大気圏に生起する個々の現象を理解するにとどまらず、海洋や河川を含む水圏、あるいは土地利用の観点からの地圏、さらには植生を含む生態圏などからの影響を把握しつつ、この地球システムを統合的に理解しようとするということであるといってもよいであろう。すなわち、たとえばある理論が予測する現象が存在するかしないかといった二元論的な問題を明らかにしようというよりは、様々な要素間の関連性をひもときながらそれらが紡ぎ出す全体像を矛盾なく定量的に把握することで、システムの機能を理解し将来の予測につながる知見を得ようとするような営みであるといえる。そのときの根拠となるのが、多様な測定手段から得られる観測データである。それらは必ずしも測定精度を向上させることのみが求められるわけではなく、たとえば、空間的な代表性には乏しいが継続的な観測として力を発揮する定点観測、空間的な変動をとらえながらメカニズム解明に有効な航空機観測、さらにはグローバルで俯瞰的な描像を得ることのできる衛星観測まで、手段は多様でそれぞれが相補的な役割を果たしている。

われわれ人類が勝ち得た一つの成功体験として、オゾンホール発見からそのメカニズム解明、さらにはオゾン破壊物質の全廃にいたる流れを振り返ってみよう。ご存知のようにオゾンホールの発見は南極域におけるオゾン全量の継続的な地上観測データによってなされたものである。定点観測ではあるが長期間のデータの蓄積があつてはじめてこういった現象の検出が可能であったといえる。観測データが示した南極域春季のオゾン減少という問題提起のあとは、航空機観測、衛星観測、さらにはモデリング研究によってメカニズム解明が進んだ。特に航空機観測は、その高い機動性を活かし、オゾンホールの中のまさにその場での観測データを得て、オゾン破壊メカニズムの理解を大きく進めることに寄与した。一方、衛星観測からの研究成果はやや出遅れた感もあったが、オゾンホールが南極大陸規模の広がりを持った現象であることを人々にわかりやすいメッセージとして伝える役割を果たした。このように様々な測定手段で相補的な観測をすることにより、科学者はその謎解きに終止符を打ち、オゾン破壊物質の最終的な全廃にいたる国際的な合意にまで人々の意識を高めることに成功した。またさらに、国際的な合意の成果が本当に実現されているのかを確

認・検証するために、フロンに代表されるオゾン破壊物質の長期モニタリングが強化された。

この一連の流れで重要な点として、ダイナミックに変化する地球システムの理解には、長期の変化傾向を正確かつ定量的に捉えるための観測（たとえば定点観測）、説得力を持ってメカニズム解明を促すための観測（たとえば航空機観測）、さらには問題点をメッセージとして社会に発信するための観測（たとえば衛星観測）などがそれぞれに必要であるということであろう。それはまた、学術研究と社会貢献という切り口として言い換えることもできる。メカニズム解明を促すような新たな観測手段は、学術的な研究を礎とするところから生まれる。一方で得られた科学的な成果は社会に還元され、たとえばモントリオール議定書やパリ協定などの形で社会実装されてゆく。その結果として、社会的な要求を踏まえつつ長期モニタリングが実現されてゆく。このように観測は大気科学・気象学の源泉であつて、そこから得られる情報はプロセス研究から気候変動研究にいたる学術活動の基盤を支えるとともに、観測データから得られる知見は社会に還元され、さらに次の課題に向けた挑戦と新たな観測につながってゆくのである。

1.2 本報告書のねらい

地球システムを理解するためには多様な観測手段が必要であり、それがまさに大気科学・気象学の重要な特性である。一方で衛星観測に代表されるように、その測定手段は非常に大がかりなものとなつてきており、単純によい測器を作るといふ部分にのみ予算と人材をつぎ込めばいいというものではなくなつてきている。なぜそういった測定が必要なのかといった事前の見極め、得たいデータ（情報）に対してどのような装置を開発する必要があるのかという要求の先鋭化、そして実際に得られるデータをどのように処理し、プロダクトとして流通（利活用）してゆくのかといった戦略がそれぞれの段階で必要になってくる。この報告書では、これらを一連のものとして全体を見渡し、それぞれの段階での問題点とそれらに対する（比較的短い時間スケールでの）解決策および（少し長い時間スケールでの）本来あるべき姿を提示することを目指す。

特に、近年はデータ量が莫大になり、社会のニーズの変化とも相まって利用形態が多様化してきている点についても章を立てて議論したい。最近 Nature 誌に“Five priorities for weather and climate research”

という記事が掲載された (Hov *et al.* 2017)。ここでは、気象学が大きな転換点に差しかかかっており、どのようにしてデータを得て利用してゆくかという観点から、社会のニーズに応じた科学成果の提供、モデルとデータの統合、観測基盤の強化、若手人材の育成、知識の共有などの重要性が述べられている。大気観測データはいわゆるアカデミックな素材として個別の専門領域の研究者によって用いられるだけでなく、それを活用するユーザー層が広く社会に存在していることが大きな特徴であるといえる。多様なデータ、大量のデータが、様々な社会的ニーズにあった形で利用されており、またそのようにデータは流通されるべきである。特に、いろいろな分野の人がデータを使うという前提があるので、データの規格化や提供手段の利便性向上という観点からも意識を高める必要がある。また、データを利用して科学的成果を生み出す人材だけではなく、データを獲得し流通することに努力する人材もコミュニティには必要であろう。こういったデータの流通にまつわる話題についても取り上げたい。

2. これまでの気象観測とその展開

最初に、過去約半世紀にわたって急速に進展してきた観測技術の高度化や情報科学の進展について概観する。さらにコミュニティの拡大とともに観測計画の規模や実施主体が変遷してきている現状について述べる。特に国際的に展開される観測計画に対して、我が国の立ち位置がどのような状況にあるのかについても記述する。

2.1 長期観測と観測技術の高度化

気象学は気温や風など、基本的な自然現象を定量的に測定することから始まったと言える。1957～58年のIGY以来、世界中の気象官署で基本的な気象要素に関する地上観測、およびゾンデ観測が整備され、ネットワーク化されてきた。その後、人が観測値を読み取り記録していた各種観測データが自動的にコンピュータに取り込まれるようになった。我が国では、降水量、気温、風向・風速、日照時間などの気象要素が、約1,300箇所（降水量のみの観測地点も含む）のアメダスによって自動的に観測されデータが取得されている。さらに自動化は進み、たとえば上空の風向風速の観測はかつてのラジオゾンデに代わって地上からのウィンドプロファイラーなどのリモートセンシング手法によっておこなわれるようになった。このように、観測の効率化が進められる中で、長期観測データを利

用するには、各種測器の検定の状況はもちろんのこと、観測地点の移設や測器の交換、観測手法の変更による影響を考える必要がある。たとえば、地上における日射量の長期変動は1960年頃から1980年代まで減少し、その後増加に転じた、いわゆる「Solar dimming and brightening」（全球的な地上日射量の減少・増大、工藤・内山 2012）という現象が世界中で観測され議論されてきた。しかしながら、このような場合に、測器の交代やオペレーションの変更がどのような影響を及ぼすのかということが必ず議論の対象になる。また、観測の自動化（無人化）は観測地点の環境の変化や測器の汚れなどを確実にチェックできない可能性がある。気候のモニタリングにおいては、これらの点も十分考慮する必要がある。

最近の特徴としては、観測項目の多様化があげられる。基本的な気象要素以外にも、エアロゾル、大気微量成分、安定同位体比など様々な項目について、長期的かつ広域にわたる観測が国内外のネットワークを通じておこなわれるようになった。また、エレクトロニクス技術やソフトウェア技術の進歩による効果も大きい。たとえば、レーダーは単純な降雨レーダーからドップラーレーダー、マルチパラメーターレーダーへと発展し、ウィンドプロファイラーやドップラーライダーなど、風を計測する手段も新しい技術が開発されてきている。近年ではこれらのデータ処理技術にも格段の進歩が見られる。さらに、データロガーの小型大容量化や携帯基地局を利用した大量のデータ転送は現場での観測の形を大きく変えたと言える。

以上のように、観測技術は格段に進歩したが、一方で、観測のブラックボックス化が進んでいることも否めない。すなわち、測定の原理や生データを物理量に変換するアルゴリズムを知らずに、物理量のプロダクトになったデータセットが簡単に入手できるようになった。その結果、観測の現場はもちろんのこと、使用する観測データの精度や特徴を知らずに大量のデータを利用する人が増えている。

基本的な気象データは他の研究分野や社会との関係においても重要である。例えば植物生態学においては、気温、降水量や日射量は重要な要素である。農業においても同様である。また、気象災害の把握や防災においては、まずは何が起きていたのかということを知るためには基本的な観測データは重要である。このような気象学を取り巻く周りとの関係性においては、観測データの定量的評価が欠かせない。この意味にお

いても、観測データの精度や特徴をよく理解することは重要である。

2.2 情報科学の進展

計算機の発展ともなっていて、気候モデルおよび現業の数値予報モデルも大きく発展した。学術研究として放射対流平衡モデルから大循環モデル（GCM）へと発展してきた気候モデルは、時空間解像度が飛躍的に改善されるとともに、全球雲解像モデルや全球化学輸送モデル、全球エアロゾル輸送モデルなど、多様な数値モデルへ発展している。地表面の植生も組み込んだ数値モデルもあり、気候モデルはより複雑化した学際的気候システムモデルになりつつある。一方、天気予報の高精度化は社会的要請でもあり、全球モデルおよび領域モデルの高解像度化が進んでいる。高時空間解像度モデルは、天気予報のみならず、メソスケール、マイクロスケールの現象を理解する上でも極めて重要である。

これらの数値モデルの良し悪しは観測データがなければ評価できない。また、数値予報モデルによって日々の天気予報をおこなう際にも初期値として観測データは必須である。初期値を作成する際にはデータ同化を通じて多種多様な観測データが用いられている。また、数値モデルとデータ同化手法の進歩、そして観測データの増加は再解析データの高精度化にもつながっている。

数値モデルに様々な形で利用される観測データの中では、衛星観測データが主流になりつつある。衛星観測は広い領域をカバーし、均質なデータを提供することができる。これも計算機や通信技術の発展によるところが大きい。静止気象衛星「ひまわり」は観測バンド数が16になり、時空間分解能も全球スキャンで10分、領域を限定するラピッドスキャンでは2.5分と世界トップレベルにある。その結果、観測されるデータ量は1日430GBに及ぶ。また、TRMMに端を発したレーダーやライダー等のアクティブセンサー搭載の衛星も打ち上げられ、衛星観測データ量は増加し続けている。これらのデータはリアルタイムで物理量に変換され、日々の天気予報や研究に活用されている。

2.3 大型観測計画と国際協力

気象学全体が大きくなるにつれて、日本が一丸となって進める研究は減少し、そのために大型観測は以前よりも目立たなくなった。以前はMAP、WCRP、GAMEなど大型国際研究は測地学審議会で建議をまとめ予算措置をして実施するなど、オールジャパンと

して推進していた。その背景には、気象学会の規模もそれほど小さくなく、指導的立場にある研究者たちがよく相談し、方向性を決めていたことがある。しかしながら、2001年に測地学審議会は科学技術・学術審議会に統合され、一部会となったこともあり、このような方式は以後見られなくなった。一方で、日本学術会議が2005年から改編され、2010年以降、大型研究のマスタープランをとりまとめることになった。以前の測地学審議会のように予算化には直接つながらないものの、国や社会に対して重要な大型研究を提示する仕組みができたことになる。同時に、気象学の研究者も増加するとともに、研究体制が拡充した。新たな組織として1997年に地球フロンティア研究システムが創設され、さらに2004年にはJAMSTEC（海洋研究開発機構）の研究部門のひとつに発展したことは、その代表例であろう。関連する研究予算も増大した結果、全体を考えて方向性を決める必要が薄れ、国際共同研究や大型観測も国際的な枠組みを利用しつつ、リーダーとなる個人とその周りの研究者のグループで自発的にできるようになった。また、気象学の大型研究は観測とモデルが一体となって進められてきたものの、海洋や陸域など他の分野と協力して総合的に観測を実施する計画が多くなり、それらのプロジェクトの中で実施される気象学の観測は、その姿が見えにくくなっている。

これらのことはある意味で喜ぶべきことではあるが、一方では、我が国の気象学関連の研究の全体像や強みと弱み、さらには国際的な立ち位置を把握することが難しくなっていることも否めない。その中で、最近では地球観測衛星について比較的国際協力が進んでいる。我が国主導の衛星としては、気象庁が運用する静止気象衛星「ひまわり」やJAXAの地球観測衛星（GCOMシリーズやGOSATシリーズ等）ともに国際協力が大きく進展している。JAXAが主導する地球観測衛星では研究公募を国際的におこない、世界中の研究者がこれらの衛星データを使って研究を進めている。これに対して、航空機、船舶を用いた観測の国際連携や地上観測の国際化については、一部を除き大きな変化はないように思われる。特に航空機観測については、温室効果ガスや雲、エアロゾルの観測がおこなわれているが、研究者コミュニティで観測専用の航空機を保有していないことがこの分野の観測の発展の障害になっている。

司令塔のないまま、気象学を含む地球観測が展開さ

れてきた結果、現在、我が国において、地球観測衛星のような多額の費用を要する観測は危機に瀕している。国の財政事情もあり、地球観測衛星については、ユーザーが自分で予算を獲得して計画を進めるべきであるという考え方が強くなっている。国土交通省の気象衛星「ひまわり」や環境省のGOSAT等とは異なり、JAXA すなわち文部科学省が自前で打ち上げる気象・気候研究に資する地球観測衛星はユーザーが見えにくい。地球観測衛星は気象学だけでなく、植生、土地利用、海洋など様々な分野で利用されるため関係するコミュニティが大きく、全体で合意の上でミッションの優先順位をつけることが極めて困難である。このような状況を踏まえ、最近では気象学会を含む20以上の学会が参加する「今後の宇宙開発体制のあり方に関するタスクフォース会合・リモートセンシング分科会」が形成され議論されるようになった。同時に、日本学術会議で2017年7月に提言「我が国の地球衛星観測のあり方について」(<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-t247-3.pdf> 2019.2.8閲覧)が発出され、科学技術・学術審議会や宇宙政策委員会において、地球観測衛星を計画、実現する道筋が作られつつある。

一方、航空機観測については、気象学会の中でも議論されてきたが、学術会議のマスタープランに採択されたものの、予算化に重要となる重点領域に採用されるには至っていない。気象学の研究は実に多様な分野をカバーしている上に研究手法も多岐にわたり、気象学会において大型研究の優先順位をつけることが困難であることも一因であろう。これは、天文学・宇宙科学の衛星や大型プロジェクトと異なる点でもある。

3. 観測対象と観測システム

第1章でも述べたように、気象学あるいは大気科学が果たす重要な役割としては、大気圏のみならず、水圏、地圏、生態圏など隣接する領域との相互作用を意識しつつ、地球システムを統合的に理解することである。個別の要素間の連関は科学的な知見としてコミュニティの間で共有化され、その知識の集大成として大規模な地球システムモデルが構築されている。われわれにとって必要な観測パラメータとは、こういったモデルにおける変数として入力されたり、あるいは将来予測の結果出力されたりするものでもある。日々の天気予報の基礎となる気温、風速場、水蒸気、雲、降水などから、より中長期的な予報に必要な海面水温

や、雪氷、海水、植生、あるいは大気微量成分まで観測パラメータは多岐にわたる。また、対象とする現象の時空間スケールによって、どういった範囲をどのくらいの時間・空間間隔で観測をおこなうべきかが変わってくる。以下では、比較的狭い範囲で短い時間スケールの現象を取り扱う天気予報と防災という観点と、グローバルで比較的長い時間スケールの問題を取り扱う気候研究と環境監視という観点から観測の実情をまとめてみる。

3.1 天気予報と防災

気象観測は、日々の天気予報やナウキャスト、また実況監視に欠かすことのできない社会インフラである。歴史的には、さまざまな気象観測データが、全球通信システム(GTS)と呼ばれる世界的な気象通信ネットワークによって、国際的に交換されてきた。GTSは、世界気象機関(WMO)の世界気象監視計画(WWW)の構成要素の一つであり、GTS構築の経緯はWWW設立の経緯そのものであるといえる(山本 1966)。1967年4月にスイスのジュネーブで開催された第5回世界気象会議においてWWWの計画は公式に採択され、この計画のもとでGTSの整備が進められてきた。GTSでは、観測データの他、気象解析・予報資料なども国際的に交換されており、世界各国が気象業務の遂行のために必要な気象データを的確に入手できるようになっている。近年では、従来のGTSによる即時性・確実性が必要なデータ交換の効率化を進めるのに加え、各国の気象機関に対して各種資料を効率良く検索・取得できるようにするために、統一した情報カタログを整備・提供するWMO Information System(WMO情報システム)と呼ばれる統合気象情報通信網が整備されている。

今日の天気予報を支える数値予報には、GTSによって配信されるデータも含めて、世界中から集められた数百万にもおよぶ観測データが利用されている。ナウキャストに関しては、たとえば気象レーダーを利用した高解像度降水ナウキャストにより、どこに強雨域があり、それが自分に向かってくるのかをスマートフォンなどで手軽に確認出来るようになった。また、LIDENのような雷の実況監視システムは、空港における地上作業の安全確保や航空機の安全運航に活用されている。テレビの天気予報に頻繁に登場する気象衛星「ひまわり」は、天気予報や防災に幅広く利用されており、例えばひまわりの雲画像により台風の位置や勢力の監視が常時可能となっている。火山の噴煙の流

れや黄砂が大陸から日本へ到達する様子なども詳細に把握することができる。輝度温度の観測データや連続する雲画像から算出される大気追跡風は数値予報に利用されている。2015年に運用を開始したひまわり8号は、観測頻度や観測バンドが飛躍的に拡充され、その利用価値はさらに高まっている。気象観測衛星だけでなく、他の地球観測衛星による水蒸気や海面水温のデータも精度の高い数値予報には不可欠なものとなっている。

今日の質の高い気象サービスは、地上気象観測、高層気象観測、気象レーダー観測、航空機観測、気象衛星観測を含む地球衛星観測などの基盤的な観測システムの上に成り立っている。従って、このような観測システムの整備や継続的な運用はコミュニティ全体で考えるべき非常に重要な課題である。例えば、世界気象機関は、4年に一度「観測システムの数値予報へのインパクトワークショップ (WS-IVOS)」を開催している (例えば、佐藤 2015)。世界各国の気象機関や研究機関・大学等が実施する観測システムの数値予報へのインパクトに関する知見を共有するだけでなく、今後推進すべき研究領域などの提言をおこなっており、将来の観測システムの構築に一定の役割を果たしている。このような包括的な議論の場は、日本国内においても参考となる取り組みと言えるだろう。

「Risk-based warning」(リスクに基づく注意報・警報) や「Impact-based forecasting」(影響に基づく予報) という言葉に代表されるように、防災・減災に直結する気象情報の提供が重要性を増しており、日本国内も含め、国際的な動きとなっている。単純な気象条件に基づく警報や予報ではなく、気象条件に基づいてどの程度災害のリスクや影響があるのかを考慮するという発想で、平成29年から気象庁が開始した「警報の危険度分布」は「Risk-based warning」の一例である。日本に暮らす上で避けることの出来ない台風や集中豪雨・豪雪などの顕著な現象に対して、それらに伴う災害の防災、減災という観点から観測要素や観測手段を検討することは今後の重要なテーマである。

例えば、降水量データの高精度・高分解能化や対流圏下層の水蒸気の流れの実体把握など、降水量、水蒸気観測の発展は、防災気象情報の高度化や集中豪雨の予測精度向上をもたらすと期待されている。また、航空機を利用した台風の直接観測なども、台風の強度の把握や台風の予測精度向上、さらには気候変動に伴う台風強度の変化という気候監視、将来の防災対策とい

う観点から期待される。衛星搭載風ライダーや無人航空機、全球測位衛星システム (GNSS) など新しい観測手段の活用も今後期待される分野である。

「地球システムモデル」に代表されるように、数値予測システムはますます複雑化・細分化、かつ大型化してきており、また一方で気象情報の利用者のニーズは多様化している。一人の研究者、一つの研究室、一つの大学・研究機関で出来る範囲のところにとどまらず、分野間で広く連携してゆくことが今後ますます重要になるだろう。海洋や陸面、また河川といった、大気境界領域との連携、防災情報を発信する地方自治体などとの連携、新産業の創設に関連した気象ビジネスとの連携など、学際的な取り組みの推進が期待される。国際的にも既にこういった分野間連携 (interdisciplinary collaborations) の重要性は認識されており、たとえば最近 WMO/WWRP から出された2016-2023実施計画書 (WMO 2017) に詳細な記述があるので参照されたい。観測システムを設計する際は、どのような観測データが予報精度の向上や防災対策に有効となるか、観測データの利用者とともに突き詰めて検討し、ステークホルダーを交えた議論をおこなうことが重要である。

3.2 気候監視

データの多様性は相互検証などの観点から非常に重要であるが、一方で特に長期間のデータにもとづいて微小な変化傾向を論議する気候研究などの観点からも、参照データ (基準データ) を蓄積してゆく試みを継続的におこなってゆく必要がある。そういった試みの一つとして、気候監視のための高層気象観測ネットワーク GRUAN (藤原 2011) がある。上層大気の情報はいまでもっぱらゴム気球に測定装置を取り付けたいわゆるラジオゾンデによっておこなわれてきた。しかし世界を見渡すとその測定装置はそれぞれの国や地域で独自のものを使うことも多く、さらには同一の機器メーカーが製作してもモデル間でバイアスを持つことが指摘されてきた。こういった既存の機器類の性質を把握し、気候研究の要請に十分に答えられるような、時間的に整合性を持ったデータセットを提供するために GRUAN は設立された。GRUAN のもとに、国と地域のバランスを考慮しながら、高精度で継続的な観測をおこなっている観測点を認定して、さらにその観測ネットワーク全体の稼働状況を見守るリードセンターが設置されている。このほかにも、一般的な気象観測要素に加えてオゾンや各種温室効果ガスなどを

観測してデータを集約・提供する WMO 全球大気監視計画 (GAW) や、太陽放射・地上放射を精密に測定するための基準地上放射観測網 (BSRN) などがあ

る。同様な問題は衛星観測データにも存在している。たとえばモントリオール議定書が有効に働いて、本当にオゾン層が回復傾向にあるのかどうかを確認しようとしたとき、データの信頼性を高める意味でも複数の衛星観測データを均質に統合した長期のデータが必要になる。もちろん個別に様々な衛星観測は存在するわけであるが、測定手法やデータの存在する期間はまちまちなのでそれぞれを整合性に注意しながら扱う必要がある。そういった試みの例として、たとえば成層圏における水蒸気・オゾンのデータベース (SWOOSH) や、成層圏の塩化水素、水蒸気、オゾンのデータセット (GOZCARDS)、成層圏オゾンの長期変化傾向やその不確実性に関する研究計画 (LOTUS) などがあ

る (Davis *et al.* 2016, Froidevaux *et al.* 2015)。また、雲や海面水温等の観測に用いられる可視・赤外イメージャも、衛星によってセンサの観測波長や時空間解像度が異なる。たとえば、ひまわり 1 号は可視・赤外各 1 バンドのみの観測で 1 日に 14 回の観測頻度であったが、現在のひまわり 8 号では可視・赤外合わせて 16 バンドで 10 分間隔、すなわち 1 日に 144 回観測を実施している。気候変動に関する長期の観測をおこなう場合には、このように観測状況が異なるセンサから導出される物理量の整合性を担保しなければならない。このように気候変動研究の裏付けとなる長期にわたる整合性を持ったデータセットを作成しようとする試みは、最終的にはデータ同化手法にもとづいて、今後は水蒸気や気温に加え大気微量成分をも含んだ再解析データの作成へと発展してゆくと考えられる。

3.3 温暖化研究と越境汚染

大気中の地球温暖化問題に関係する物質の観測は現在多岐にわたっている。歴史的には、1970 年代末に二酸化炭素濃度の高精度観測が我が国でも開始され、その後、メタン濃度の観測や亜酸化窒素などの各種温室効果ガスの濃度も観測が開始された。それ以前にも二酸化炭素など温室効果ガス濃度の観測はおこなわれていたが、地球温暖化問題の視点で濃度変化の要因をグローバルに捉えるためには観測精度が不十分であった。その後、温室効果ガスについては、炭素や酸素の同位体比も観測されるようになった。また、人間活動に起因する物質として、太陽放射を散乱吸収し、一般に温

室効果ガスとは逆に地球の冷却化や雲特性に影響すると考えられているエアロゾルの観測も近年大きく進展している。

大気中において化学反応が不活性ないわゆる長寿命の温室効果ガスの一般的な観測手法は、フラスコに空気をサンプリングし、実験室に持ち帰って分析器で濃度を測定するというものである。たとえば、温室効果ガスの赤外放射吸収特性を利用して、予め濃度が高精度で検定されている標準ガスとの比較から濃度を求める。これらの観測は空気のサンプリング技術の向上や自動化に伴い、現在では地上観測はもとより、民間航空機、船舶、さらには成層圏まで到達する大気球を用いて実施されている。我が国でも大学、大学共同利用機関、気象庁、環境省の観測が大きな国際貢献をしている。また、標準ガスについても国際的なネットワークで相互比較がおこなわれており、データの標準化が進んでいる。

温室効果ガスの観測で近年特筆すべき点は、衛星による観測が大きく進展したことである。我が国の温室効果ガス観測衛星 GOSAT (いぶき) をはじめ、アメリカや中国でも同様な衛星が打ち上げられ、地上観測ネットワークや大気輸送モデルと組み合わせることにより、大陸スケールでの二酸化炭素収支やより高い解像度でのメタン発生量の時空間分布がわかるようになった。これらの衛星観測の原理は、大気で散乱反射される太陽放射の近赤外域における分光観測や熱赤外域の分光観測から広い意味での逆問題を解くことにより温室効果ガスの濃度を推定するというものである。

一方、エアロゾルは化学組成が多岐にわたることや、外部混合、内部混合の状態が複雑なために、観測も多様な手法で実施されている。気候への影響を評価する場合には、エアロゾルの光学的厚さ (光の消散係数を大気の厚さで積分した値) が重要な項目となる。光学的厚さは地上における太陽放射の直達・散乱成分の分光観測、あるいは衛星による太陽放射の散乱の分光観測によって求められる。これらの観測から気柱全体のエアロゾルの粒径分布や一次散乱アルビードも推定することができる。粒径分布と一次散乱アルビードは化学組成とも関係しており、これらの情報は気柱全体のエアロゾルの化学組成の推定に利用される。一方、エアロゾルの鉛直分布はライダー (レーザーライダー) によって観測する。ライダー観測からはエアロゾルの後方散乱係数や消散係数の鉛直分布が観測できるが、その精度は依然として改善の余地がある。

エアロゾルの光学特性は粒子の大きさと化学組成で決まるが、これらを同時に高精度で測定することは極めて難しい。地上観測に限定すれば、エアロゾルをフィルターにサンプリングし、実験室に持ち帰ることにより化学組成の分析をすることができる。サンプリングの際にカスケードインパクターを用いれば粒径ごとの組成分析も可能である。これらの観測とは異なり、大気中に浮遊したエアロゾルを取り込み、イオン化させて個々の粒子ごとに質量を測定することで粒子の大きさと化学組成を推定するエアロゾル質量分析計 (aerosol mass spectrometer) という技術も普及してきている。また、一般的な環境モニタリングサイトでは、PM2.5やPM10など、化学組成には関係なく、ある粒径以下のエアロゾル粒子の質量密度を観測することがおこなわれている。近年、特に健康への影響の観点から、PM2.5が注目されている。以上のような多様なエアロゾル観測は、地上観測と衛星観測を組み合わせたり、さらにはエアロゾル輸送モデルも併せて活用したりすることにより、越境汚染の解明や地球全体のエアロゾル分布の変動メカニズム解明に貢献している。

最後に、雲凝結核の解明がエアロゾルの観測における大きな課題として残されていることを指摘しておく。エアロゾルが雲凝結核として機能することは周知のとおりであるが、すでに述べたようにエアロゾルは多様な化学組成と粒径分布、さらには混合状態が複雑なため、雲凝結核の特性を理論的に解明することには限界がある。たとえば、黄砂のような土壌粒子は一般には雲凝結核にはなりにくいですが、他の種類のエアロゾルが存在していなければ雲凝結核として機能する。一方で、土壌粒子と海塩粒子が混合していれば、海塩粒子の方が過飽和度は低くても凝結しやすいので雲凝結核として働き、土壌粒子は雲凝結核にならないことになる。土壌粒子やブラックカーボンに硫酸や硫酸塩が付着すれば、粒子の雲凝結核としての特性は大きく変わるが、これらの特性は地球上の場所や季節で時々刻々変化するので観測をしなければ、その実態を明らかにすることができない。

3.4 まとめと課題

ここまでで見てきたように、地球システムの理解を目指す気象学にとって必要となる観測パラメータは多岐にわたっている。のちに第4.1節で出てくる観測システム実験などから、より支配的なパラメータやその特徴的な時空間スケールを見積もることは可能である

が、単純にどのパラメータが重要であるといういい方は不可能である。同時にその観測手段も、長期的な変化傾向を定量的に捉えるのに適した定点観測、メカニズム解明に威力を発揮する航空機などの移動体による観測やレーダーなどのリモートセンシング観測、グローバルな視点をわれわれにもたらす衛星観測など、それぞれに長短があって単純に精度よく広い範囲が測れればいいというものでもない。このように気象学にとって観測とは多様性を持つものであるといえる。

これまでになかったパラメータの取得や新たな測定装置の開発はこういった多様性を担保するために必要な活動として位置づけられるが、こういったパラメータの取得にあたって、これまでではどちらかという観測精度の向上が大きな目標であった。しかしながら第5.2節で述べられるデータ同化技術を念頭においたとき、観測精度が必ずしも高くなくても大量に生成されるデータをどのように活用するかが問われている。たとえば近年、スマートフォンから送信される膨大な位置情報・速度情報をもとに道路の混雑情報などが提供されている。将来、車の自動運転などにもなって、基本的な気象要素を観測するようなシステムが車に設置され、そのデータが位置情報とともにネットワーク上を駆け巡るような時代がやってくることが想像される。

観測には、ときに想像を超えるような大きなリソースが割かれており、測器の開発や観測・運用における人的リソース、予算獲得のための甚大な努力が、個々の観測データの背景にはあり得る。われわれが普段当たり前のものとして受けとっている気象サービスは、こういったひとつひとつの観測の積み重ねがあって実現されている。まずは、この事実を強く認識し、またコミュニティとしても科学的根拠に基づいて正当に観測を評価し、観測データがなければ今日の質の高い気象サービスを受けることはできないことを啓蒙することは重要であろう。また、観測データと一口にいっても、現業的な観測、研究要素の強い観測、研究目的の観測でも現業的に有益な観測、逆に現業観測でも研究に有益な観測など多様性がある。観測をおこなうさまざまな母体が有機的に連携し、持続可能な観測を実現するための枠組みの構築や、研究と現業の相乗効果を生み出すような取り組みは、国の財政事情が厳しいなか、ますます重要な課題と考えられる。

4. 観測計画の評価

科学者が個人の興味からある物理量を計測するような場合はまだしも、現在ではたとえば衛星観測のように大規模でかつ観測計画を実施するコストも大がかりになるような場合は、事前にその観測計画が妥当かどうかを評価することが重要になる。これは同時にそれを実施するコミュニティの構成員が、共通の問題意識を持ってその観測計画を実施してゆく上での根拠となるものである。以下ではそのような観測評価システムに関わる話題を取り上げる。

4.1 観測に関する事前評価方法の進展

既存の観測データや新規の観測データの数値予報へのインパクトを評価する手段として、観測システム実験 (OSE) は有効な手段である。OSE は、評価対象の観測データを同化した初期値と同化しない初期値からそれぞれ予測実験をおこない、その差から観測データの数値予報へのインパクトを評価するものである。一方、将来の観測システムを設計する際、それが実現した際の数値予報へのインパクトを評価する手段も提案されており、観測システムシミュレーション実験 (OSSE, 例えば、石橋 2013) と呼ばれる。この他、感度解析も観測のインパクトを評価する有効な手法で、個々の観測がどの程度数値予報の改善に寄与しているかを定量的に評価する観測感度解析と、数値予報の精度を効果的に向上させるための観測場所を推定する予報感度解析がある (例えば、山根・伊藤 2012)。第3.1節で述べた WS-IVOS では、世界各国の気象機関や研究機関・大学等が実施した OSE や OSSE、感度解析の結果が数多く紹介されている。

OSE, OSSE とともに、観測データのインパクトを評価するための数値予報モデルとデータ同化システムが必要となる。また、観測データのインパクトを標準実験と比較するためには、標準実験で使用する観測データも必要である。感度解析では、数値予報モデルの随伴モデルやアンサンブル予報のデータセットを利用する。従って、研究コミュニティがこれらを利用して OSE や OSSE による感度解析を実施することが出来るような環境を整備してゆくことが課題である。そのためには、現業の気象機関と研究コミュニティが双方にとってメリットのある関係になれるような枠組みや連携の強化が重要と考えられる。

観測データの数値予報へのインパクトを評価する際の評価基準はさまざまである。慣例的に用いられるのは全エネルギーノルムで、検証対象領域全体のパ

フォーマンスの評価に適している。一方、台風や集中豪雨・豪雪など顕著な現象の予測に重要な観測は、平均的な予報のパフォーマンスを向上させる観測とは異なる可能性がある。そこで、防災に直結するような、顕著な現象の予測精度を向上させる観測システムの評価は今後重要性を増すであろう。

プロセス研究、また数値シミュレーションの評価という観点も観測計画の評価には不可欠である。エアロゾル・雲・降水過程のメカニズム解明や台風の発生・急発達メカニズムの解明、また気候変動にともなう気候システムの応答など、個々の物理過程やその相互作用を明らかにすることは気象学的に重要な課題である。また、計算機の性能向上に伴って大きな渦を解像するラージエディシミュレーション (LES) や直接数値シミュレーション (DNS) のような超高解像度の数値シミュレーションが実現可能となっており、そういった新しい数値シミュレーションの妥当性を評価するための観測も重要となる。プロセス研究はそれ自体非常に重要な基礎研究である一方、最終的には数値モデルに還元され予測精度の向上に繋がるという側面があること、また今日の数値モデルはこれまでの地球観測に基づく多くのプロセス研究の蓄積の上に成り立っていることは、地球観測の重要性を再認識する上で非常に重要な事実である。

4.2 気候研究に向けた長期モニタリング

第4.1節では、観測システム実験 (OSE) あるいは観測システムシミュレーション実験 (OSSE) が既存の観測データや新規の観測データの数値予報へのインパクトを評価する手段として有用であることを述べた。時間スケールが短く、実験結果を実況の場と容易に比較できるような場合は、まさにこういった手法の有効性は明らかであるといえる。では、気候研究のように時間スケールが長い問題に対して、こういった考え方で観測システムのデザインをおこなっていったらよいであろうか。

第3.2節では、気候監視という観点から必要となる観測要素と、観測のネットワーク化と標準化の必要性について述べた。そういった具体的な観測ネットワークとして、気候監視のための高層気象観測ネットワーク (GRUAN)、一般的な気象観測要素に加えてオゾンや各種温室効果ガスなどを観測してデータを集約・提供する WMO 全球大気監視計画 (GAW)、太陽放射・地上放射を精密に測定するための基準地上放射観測網 (BSRN) などを紹介した。こういった観測網が

国際的な協力関係の中で展開されているという事実は、まさにそれらの取り扱う気象パラメータが気候研究を進めてゆく上で重要であるという研究者の見識とその共通認識の表れであるといえる。そこで注目されている気象パラメータは、将来予測モデルにおける構成要素の鍵となるものであり、モデル出力の解釈にあたって必須の物理量である。

一方でこれらの観測網が取り扱う気象パラメータである温度や微量気体、大気放射などは将来予測をおこなう大気モデルにおいてはすべてが込みで取り扱われる。それらのパラメータは独立ではなく、相互に関連し合っており、大気モデルの中での重要性として、もしかしたら主と従の関係がある可能性もある。すなわち、その大気モデルシステムの中で、注目する気象パラメータがどのような感度をもっているのかを知ることによって、そのパラメータを観測することの重要性が理解されるようになる。こういった問題を考える際のヒントになるのが、近年精力的におこなわれている再解析データの作成かもしれない。気象庁55年長期再解析 (JRA-55, Kobayashi *et al.* 2015; Harada *et al.* 2016) では、利用可能なデータをすべて取り込んだ標準プロダクトのほかに、衛星データを使用せず従来型観測データのみを同化したプロダクト、観測データを用いず境界値のみを使用した数値モデル結果によるプロダクトを同時に提供することによって、衛星観測のインパクトやモデル自身の特性について考察することが可能になっている。現時点では、衛星観測データと一口で言ってもオゾンなどの大気微量成分に関するデータのインプットはないが、将来的にこういったパラメータも含めた同化実験をすることによって、モデルシステムにおけるそれぞれのパラメータの感度に関する考察が可能となり、気候研究にとって本当に重要なパラメータは何なのかということをより定量的に議論することが可能になると予想される。

4.3 まとめと課題

観測の評価には、まずはその道具立てとなる観測データやデータ同化システム、数値予報モデル等が必要である。道具立てへの「アクセス」が問題解決の鍵となるが、データ・ツールの提供、共有、オープン化という解決方法もあれば、道具立てを持っている研究者・研究機関等との連携という形もあるだろう。一例を示すと、衛星搭載のドップラーライダーの実現を目指した取り組み (Ishii *et al.* 2017; Okamoto *et al.* 2018) で、センサの開発を主導した情報通信研究機構

と OSSE の基盤システムを持つ気象研究所とが手を組んで観測計画の事前評価をおこない、衛星搭載ドップラーライダーにより数値予報の精度、特に熱帯域の予報精度が向上することを確認した。まだ衛星搭載ドップラーライダーは実現していないが、観測従事者とモデル開発従事者とが手を組んで観測の事前評価をおこなった成功事例の一つと言えるだろう。モデル開発者はセンサの特徴や限界、センサ開発者は数値モデルにおける観測データの取り扱いなど、お互いに知識を補完できるのもメリットの一つである。このような分野間連携は重要であり、また分野間連携が促進されるような環境の整備という視点も重要である。

観測には予算、人材など多くのリソースが必要である。限りあるリソースで「最適」な観測システムを構築することを目指すことになるのだが、観測の評価基準には十分に気をつける必要がある。たとえば、ある1地点のラジオゾンデのインパクトを評価するために、その1地点の観測を除いた1か月の予報実験をおこなって北半球500hPa面ジオポテンシャル高度 (Z500) の平均二乗誤差 (RMSE) で評価したとしても、そのインパクトは限り無くゼロに近いであろう。しかし、だからといってこの1地点のラジオゾンデが数値予報に役立たないと判断するのは拙速であろう。観測の評価にはその評価基準を何にするのか、また評価基準は一つで良いのかなど、科学的に十分に議論をおこなうことが大切である。WMOの「観測システムの数値予報へのインパクトワークショップ (WS-IVOS)」がおこなわれているような観測評価の包括的議論の場は重要で、その国内バージョンとなる議論の場は気象学会が主導できる取り組みの一つかもしれない。また、国の財政事情が厳しいなか、新たな観測を展開したり、既存の観測を継続・発展させたりする際は、観測の社会的インパクトや経済的な効果などを学術的、定量的に評価することも重要である。

一方で、気候研究の基盤となる長期モニタリングデータを継続的にかつ信頼性を確保しながらおこなうための仕組みも重要となる。将来予測モデルにおいて鍵となるような観測パラメータを明確に認識した上で、観測のネットワーク化、標準化を進めてゆく必要がある。どの気象パラメータが重要であるのかといった見極めは、次節でも述べるデータ同化システムを基盤にした再解析データを用いることによって可能となってくる。さまざまな入力となる観測データの違いを意識した再解析データプロダクトの解析をおし

て、パラメータの感度に関する考察が可能となり、気候研究にとって真に重要な観測要素の把握が可能になると考えられる。

5. データのプロダクト化

地球観測は量の拡大とともに質も向上してきているが、個々の観測を集めるだけでは利用価値の高いデータとはならない。レーダー観測や衛星観測に代表される遠隔観測では、観測量を物理量に変換するリトリバーバルがおこなわれている。また、一貫した過去の大気の状態を推定するため、様々な観測データを比較的新しいモデルに取り込んで再解析データが作成されている。この章では、データをより有効に活用するために必要な道具立てについて考える。

5.1 観測の原理とリトリバーバル

リトリバーバルは、センサにより測定された膨大なデータから物理量を推定する逆問題（インバージョン）である。精度の向上や効率的な処理等を目的として、変数の性質に応じた経験的な工夫が加味されるため、リトリバーバルのアルゴリズムは複雑なものとなっている。他方、その基本的なアルゴリズムは数学の理論に基づいており、最適化アルゴリズムのような応用範囲の広い一般的な数値手法が利用されている。そのため、数学的背景やアルゴリズムの原理を理解することは有意義であり、教育的価値が高い。しかしながら、気象学の学生にとってリトリバーバルのアルゴリズムを学ぶ機会は非常に限られている。学生に限らず、リトリバーバルによって得られたデータを利用するユーザーにとっても、データの検証やデータの性質、限界を理解するために観測の原理やアルゴリズムについて知ることは重要である。

リトリバーバルで用いられている観測演算子（観測モデル）は、実際の観測データのみならず、数値モデルからの出力にも適用することができる。このような擬似観測は、センサのふるまいを模擬したもので、数値モデルの検証に用いられる。日本でも政策にエビデンスが求められるようになりつつあることから、衛星データシミュレータに代表される高精度の擬似観測が観測システムシミュレーション実験（OSSE）によるセンサの事前評価をおこない、新しい観測の導入や長期観測の継続の必要性を国民に対して説明する際に活用することが望まれる。

地球観測ではハードウェアやデータの取得だけでなく、付加価値の付与が極めて重要であることから、リ

トリバーバルの知識を備え利用価値の高いデータを作成できる人材が必要とされる。我が国において、そのような人材は一部の研究機関や大学に少数が所属しているだけである。せっかく観測されたデータをより有効に利用するためにリトリバーバルに関する教育を充実させる必要があり、学会としても観測の原理やアルゴリズムに対する理解の促進に努めるべきである。

5.2 データ同化と再解析

リトリバーバルが主としてモデルに依らない独立した観測としてのデータを作成するのに対し、データ同化は現業予報における予報・解析サイクルの中で観測をモデルに取り込み初期値として用いるためのデータを作成する。データ同化によって、数値天気予報や再解析データの作成において観測を有効活用することができる。レーダーや衛星データのリトリバーバル及びデータ同化がよりどころとする数学は共通なものが多いが、独立に発展してきたため同じ概念に別の用語を用いていることが少なくない。近年のデータ同化技術の急速な進展がリトリバーバルの手法にも影響を与えつつある。他方、リトリバーバルの分野に蓄積されている衛星データの取り扱いやデータ同化の技術の高度化に寄与する。リトリバーバルとデータ同化は別の分野として発展してきたが、地球観測のビッグデータから情報を取り出す手法として、交流を進めることにより一層の発展が期待される。

10年ほど前には、観測データを用いたデータ解析研究とモデルを用いたシミュレーション研究とは、結果を相互に比較することはあっても独立していた。データ同化研究の進展とともに、知識やコードが共有されるようになり、気象庁の外でもデータ同化研究や同化プロダクトの作成がおこなわれるようになった。地球観測はデータ同化システムに入力するために欠かせないデータであるが、再配布に制約のあるデータとそうでないものが混在していることが流通の阻害要因であった。我が国においても制約のあるデータの分離をおこなったデータの提供が開始されたことから、これを有効活用することによりデータ同化研究が発展してゆくことが期待される。

再解析データは、比較的新しいモデルを用いて過去の場合を一貫して再現したプロダクトである。観測データの整備やデータ同化アルゴリズムの改良に伴って、再解析の品質は近年目覚ましく向上し、より長期間にわたるデータセットが作成されている。再解析はこれまでの気候変動を捉えるデータとして有用であるとの

認識が高まっており、モデルの検証や気候変動監視に用いるために、入力する観測データの整備、アルゴリズムの改良を通じた質の改善や期間の長期化、分解能の向上が望まれる。一方、観測データで修正したシミュレーションである再解析は、観測と誤解して利用されたりすることがある。データ同化手法に関する知識の普及を通じて、再解析に対する理解を広げる必要がある。

再解析データの質を一層向上させるためには、数値モデルの精度向上が不可欠である。再解析を付加価値の高いデータとして活用してゆくためには、単に観測するだけではなく素過程に対する理解とそれをモデルに反映させることが必要である。したがって、地球観測の専門家と数値モデルの専門家が情報交換を密にできるような機会を増やしてゆく必要がある。

5.3 まとめと課題

データ同化や数値モデルの技術革新が進んだ結果、再解析データは気候変動の監視に利用されるようになった。今後も長期にわたって監視を継続するためには、過去のデータの発掘と整備、継続的な地球観測によりデータの質を保証してゆくことが必要である。

観測やそれを入力としてリトリバルや同化により作成されたデータセットは、入手可能であるだけでは不十分である。データを利用するためには、フォーマットについて記述したドキュメントやツールやライブラリが必要となる。データを作成するために用いたアルゴリズムやモデル等も併せて共有されることが望ましい。その際、気象庁、JAXA、JAMSTEC等のデータ提供者に全てを依存するのではなく、利用者である研究者もツール類の整備に積極的に関わってゆくべきである。そのためには、関係者が自由に情報交換できる場や機会を積極的に設ける必要がある。

研究における付加価値は物理量への変換を意味することが多いが、社会還元のためには「顕著現象の発生ポテンシャル」のようなプロダクトにすることが求められる。プロダクト作成には複数のデータセットを必要とすることもあるが、プロダクトを有効に用いるためにはそれぞれのデータセットがどのような前提の下、どのような手法で作成されたという情報が必要となる。そのため、データ自体だけでなくドキュメントやメタ情報の提供も同様に重要である。

このように観測量から物理量、さらには実用的なプロダクトへと付加価値を高め、研究や業務に最大限有効利用するためには多くの労力が必要である。我が国

は地球観測に多大な貢献をしているが、アルゴリズム開発など基盤的な領域における人材が十分ではない。多額の投資をして得られる貴重な地球観測を活かすために、基盤的な領域における人材育成は急務であるといえる。人材育成を支えるための組織の充実や適切な業績評価の検討も望まれる。

6. データの流通、オープンサイエンス

ここまで書いてきたように、近年は地球観測データが多岐にわたり、またその容量が膨大になってきている。一方でデータ利用に対する社会的なニーズが高まってきている状況の中で、科学コミュニティあるいは現業セクターが観測データを抱え込むことなく、広く流通させることが求められるようになってきている。社会が求める科学者の役割が変わってきており、科学者がアカデミックな興味でデータを獲得・解析するだけでなく、取得したデータとそこから得られた科学成果をさらに広く社会に提供してゆくことが期待されているともいえる。その意味で、データはまさに科学の信頼性を担保する役割、あるいは科学と社会の相互信頼関係を緊密にする役割を果たすようになってきている（例えば、村山 2013）。以下ではそういった現状と、データの質を保証するために近年注目されるようになってきているデータジャーナルやデジタルオブジェクト識別子（DOI）に関する話題を紹介する。

6.1 社会との接点

昨今、データの改ざんなどに関わる相次ぐ研究不正が科学と社会の信頼関係を揺るがしていることは憂慮すべき状態であり、科学者は襟を正して研究倫理を遵守する必要がある。そのもっとも基本的なところは、論文の再現性・再検証を担保することであり、そのためには論議の基礎となるデータの素性が明らかになっている必要がある。すなわち科学技術の成果物としてのデータが、論文として成果を取りまとめる際に必要不可欠な存在になっており、科学者としての役割が論文だけでは評価できなくなっているといえる（例えば、村山・林 2014）。特に大規模な衛星観測データなどは、コミュニティさらには社会にとって共通の資源・基盤となっている。一方でそのデータの生成・整備は、科学者としての高度な知見や見識にもとづき時間と労力をかけておこなわれるべきものであるが、こういった作業は科学者の業績としてこれまでなかなか認められてこなかったという現状がある。科学成果を創出するための業務サイクルにおいて不可欠なデータ

の生成・整備をおこなう研究者の立場が評価されない限り、科学者に対する社会からの信頼を維持してゆくことは難しい。

逆に、科学者コミュニティから社会へ提供できる研究生産物としてこれまでは論文だけが評価対象でありクローズアップされがちであったが、データもまた科学者の業績と認められ、適切な引用・参照とともに利用されるならば、社会と科学の相互信頼を深めるとともに科学者によるあらたな研究チャンスの創出が期待される。そのためにも、えてして議論が研究不正の防止といったネガティブな方向に向かいがちな流れを断ち切って、科学研究の新しい可能性を生み出すために科学者コミュニティが今後データをどのように扱うべきか、みずからポジティブに考えて発信してゆくことも今後はますます重要になると考えられる。これにもなって必要となる人的・予算的根拠あるいは保存施設などまだまだ課題はあるが、科学の新しい飛躍のための議論がおこなわれることが重要であろう。

6.2 質の保証

では具体的にどのようにしてデータの質保証がおこなわれているのであろうか。もっともわかりやすい例は、最近のいわゆるデータジャーナルの登場であろう。これまで、純粋に科学的な興味にもとづいた研究成果をとりあげる論文誌だけでなく、測器や数値モデルなどの技術基盤を記述する論文誌は存在していた。これに加えて近年、科学的に有用なデータの内容を記述する論文誌があらわれている。たとえば代表的なものとして、Scientific Data (Nature), Data in Brief (Elsevier), Geoscience Data Journal (Wiley), Earth System Science Data などがある。このなかで、Geoscience Data Journal は英国王立気象学会 (Royal Meteorological Society) のジャーナルの一つとして刊行されている。また最近、国内でも国立極地研究所が学術出版物のカテゴリーの一つとして Polar Data Journal を創刊している (南山ほか 2017)。このように出版社のみならず、学会や研究所といった組織がデータジャーナルを刊行し、データの中身に関する記述に対して責任を持つことで、信頼性を確保しようとしている。

上記したデータジャーナルの投稿規定を見ると、たとえば Earth System Science Data では、対象となるデータにはデジタルオブジェクト識別子 (DOI) が付与されていることという条件が付されている。雑誌によってこの制約はゆるいものもあるが、基本的には

データの所在が明確であることが投稿の必須条件となっている。DOI は今では論文アクセスにあたって当たり前となっている検索のための識別子であるが、同じ仕組みをデータに対しても適用することにより、責任を持ってデータを管理・提供する取り組みが、国際的にも広がりつつある (例えば、国際コンソーシアム DataCite など)。DOI は、永続的識別子 (PID) のひとつであり、変化しやすい通常のウェブサイト URL と異なり、対象とするオブジェクト (論文にかぎらない) へのリンク情報を長期にわたって国際的に継続提供するため仕組みでもある。DOI を振ることで、そのデータを利用して成果を得た場合、論文の中で過去の論文を引用するように、データに振られた DOI を引用することによって、データ作成を目に見える形で業績としてカウントすることを可能にするのである。一方で、学協会や研究機関においては良質なデータの作成とアーカイブを科学的な業績として認知する必要がある。

ではいったい誰がどのようにしてデータを保証するのであろうか。中身についてはデータを生成した研究者が初段階の責任を持つことになるが、最終的にはデータを永続的にアーカイブすることになる機関 (研究機関がよいか、図書館のような資料保存目的の機関がよいかは議論が必要である) が責任を持たざるを得ない。そのデータ提供機関 (データセンター; 近年は「データリポジトリ」と呼ばれる) のあり方を外部からチェックする仕組みが国際的に展開されつつある。主に理工学系データリポジトリを対象とする ICSU-WDS (渡邊 2012) と主に社会科学系のデータリポジトリを対象とする DSA (Data Seal of Approval) がそれぞれの認証要件を持ち寄って 2017 年 9 月に発足した新しいデータリポジトリ認証が CoreTrustSeal である (例えば、科学技術振興機構 2017; 国立国会図書館 2017)。ここでは最低限の 16 項目で審査をおこない国際認証をおこなっている。認証要件としては、データリポジトリのガバナンス、外部有識者のフィードバックの有無、データ整備作業体制、事業継続プランなどであり、組織の存続というよりはデータがどう扱われるかが主眼となっている (論文原稿の例でいえば、出版社がなくなってもジャーナルごと他出版社や国立図書館が引き継ぐなど)。そこで永続的に保存対象となる個々のデータについては、上述した DOI に代表されるようなデータの永続的識別子の登録が強く推奨されている。このようにデータの識別子をはじ

め、そのメタデータ（データに関する記述、情報、図書でいう書誌情報を含む）、保存機関の信頼性（図書でいうと出版社や図書館の運営の健全性、外部からの透明性など）といった、情報が失われないための基盤的仕組みのチェック機構となっている。このようにして、国際学術誌で論文の根拠となるデータの格納場所としての信頼を得るために国際認証が求められるようになってきている。国際学術出版社がそれぞれ自国や自社の関連機関を認証済みデータリポジトリとして推奨する動きもある一方、国内でもデータ保存機関が認証を受けて国際的に認知できるようにしてゆくことも今後重要になるのではないだろうか。

6.3 まとめと課題

観測データ量が膨大となり、利用者の多様な要望にも応えるようなデータ提供をおこなうためには、論文に加えてデータを科学者の営みから生ずる重要なアウトプットとして位置づける必要がある。しかしながら現実には、若手研究者などが論文の基礎になるべきデータ整備に時間を使っており、科学的な事業を推進する上で不可欠な業務であるにも関わらず正当に評価されない状態が続いている。こういった状況を改善するための国際的な議論がおこなわれてきてはいるが、データの生成、整備、外部利用のための作業をする専門家の評価はまだ議論の途上にあるといえる。研究機関や専門機関において科学研究や業務の一環としてデータの整備、公開事業をおこなうことを、科学業績への貢献として評価する姿勢が今後ますます必要になってくる。

7. 現状の共通認識と今後の展望

ここまでの議論をまとめ、問題点に対する共通認識を確認しながら、気象学会としてその問題に対してどのような取り組みが可能か、今後の展望について以下に取りまとめる。

観測データの重要性に関わるコミュニティの意識形成：

現在、気象学の研究では大量の観測データが利用されている。一方で、フィールドでの観測は多大な労力を要するために最近の若手研究者には不人気である。衛星観測データについても、自分で新しいアルゴリズムを開発して生データから物理量に変換するような研究は極めて少なくなってきている。数値計算を用いて研究する人も観測データの解析をする人も、再度、観

測とは何か、自分が使っているデータはどのようにして作られたのかということを理解する必要がある。観測はなぜ必要か、気象学において観測はどのような役割を果たしているのか、というようなことについて、気象学会の中で共通理解を図ることが重要である。そのためには、春・秋の大会でシンポジウムをおこなうなど工夫が必要であろう。

観測データの有効利用：

観測はリトリバルデータや再解析、実用プロダクトとすることにより初めて多くの利用者により幅広く有効利用される。このようなデータは科学的・社会的な利用価値が非常に高いことに鑑み、学会はリトリバルやデータ同化のアルゴリズムについての教育普及や研究開発を促すとともに、関係者のデータ作成が業績として適切に評価されるように支援すべきである。気象庁の現業データや大学・研究機関等が収集した観測データを付加価値のあるリトリバルデータや再解析、プロダクトとして有効活用するために、データ作成者と利用者とは対等の立場で情報交換することを奨励し、その機会を積極的に設ける必要がある。

観測計画とその事前評価：

観測計画の策定にあたってその評価をおこなうことは重要であるが、必ずしも、その技術基盤がコミュニティで共有され当たり前のように利用されるところまでは至っていない。その最初の足がかりとして、研究者等が参画し観測計画やその評価に関する調査・研究の「見える化」を進めるような活動を学会が中心となって取り組んでゆくことが考えられる。WMOでは観測システムの数値予報へのインパクトワークショップ（WS-IVOS）を4年に一度の頻度で開催して、過去4年間のレビューと今後4年間の方向性を議論し提言につなげている。たとえば、本レポートの各章で取り上げられている個別のトピックについて、これからの方向性に関するレポートと発表資料を作成し、レポートを集約してドキュメントとして残すことにより、課題となる問題についてのレビューと今後の展望がコミュニティに対して「見える化」される。

大型観測計画の策定とその実現に向けて：

衛星観測に代表される大がかりな観測計画を進める際には、関係する分野の研究者のみならず、政府機関や国際機関との連携協力、さらには社会の多様なス

ワークホルダーのニーズを考慮する必要がある。そういった調整をおこなうための活動が、たとえばTF地球科学研究高度化ワーキンググループとして最近立ち上がってきており、学会としても積極的に関わってゆく必要がある。大型の観測計画を推進するにあたっては、気象学会として何をどのように観測すべきかということを検討するとともに、関連学問分野の国内外における状況をよく把握し、我が国の強みを活かした観測計画を策定することが望ましい（TF地球科学研究高度化ワーキンググループ2017）。

社会に対する観測データの重要性についての発信：

一般社会においては、たとえばテレビや新聞等の日々の天気予報を通して静止気象衛星「ひまわり」の画像は頻繁に目にする情報であるが、一方で、通常の前報業務における数値計算で多くの観測データが用いられていることはあまり認識されていない。また、どのようにして観測データを物理量に変換しているかということについて知っている人は極めて少ない。地球観測は地球の歴史の記録であり、実験などと違って後から再現できないということを社会に知ってもらう必要がある。小中高等学校などにおいても、自然を計測（観測）することの重要性を教育することが望ましい。

コミュニティあるいは社会にとってのデータの意義：

社会の広いユーザー層によるデータ利用の基盤を確固たるものとするためには、研究者は論文成果だけではなく研究活動の基盤であるデータを自らの営みから生ずる重要な成果物として位置づける必要がある。そのためには、データに対してデジタルオブジェクト識別子（DOI）を付与するなどしてトレーサビリティを担保するとともに、様々な分野のユーザーがデータを使うという前提のもとで、データの規格化を進めるなどして提供手段の利便性向上という観点からもコミュニティの意識を高めてゆくことが大切である。さらにコミュニティの健全な発展のためには、データを利用して科学的成果を生み出す人材だけではなく、データを獲得し流通することに努力する人材も必要であることを認識して、その活動の正当な評価をコミュニティがおこなってゆかなければならない。

多様な装置開発に向けた理工横断的な取り組み：

このレポートでは装置開発に関わる話題は取り上げなかった。気象学あるいは大気科学が目指す地球シス

テムの理解のためには、さまざまなパラメータの観測が必要であり、一つのパラメータを取り上げても多様な観測手段が存在するためである。物理学や天文学などの研究領域では、設定した科学的な問題を解明するために必要な観測パラメータの物理的な性質とそれを計測する原理とが近いところにあるため、同業者が測器開発と観測のどちらもおこなうようなケースが多い。一方で大気科学あるいは広く地球科学の分野では必ずしも測器開発がその分野の学理と結びついていないことがほとんどであるといえる。観測パラメータあるいは観測手法の多様性は、大気科学分野における重要な特性ではあるが、同時により先進的な観測装置の開発を目指すためには日頃から工学研究者との分野を越えた交流の機会をもつ必要がある。さらに高度な技術を保持・伝承し最先端の観測を継続してゆくことも重要な課題である。

参考 URL

BSRN

<https://bsrn.awi.de> 2018.11.29閲覧。

CoreTrustSeal

<https://www.coretrustseal.org> 2018.11.29閲覧。

DataCite

<https://www.datacite.org> 2018.11.29閲覧。

Data in Brief (Elsevier)

<https://www.journals.elsevier.com/data-in-brief> 2018.11.29閲覧。

Earth System Science Data

<https://www.earth-system-science-data.net> 2018.11.29閲覧。

GAW

https://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/gaw_home_en.html 2018.11.29閲覧。

Geoscience Data Journal (Wiley)

<https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/journal/20496060> 2018.11.29閲覧。

LOTUS

<https://www.sparc-climate.org/activities/ozone-trends/> 2018.11.29閲覧。

Polar Data Journal

<https://pdr.repo.nii.ac.jp> 2018.11.29閲覧。

Scientific Data (Nature)

<https://www.nature.com/sdata/> 2018.11.29閲覧。

- 覧。
- 略語一覧**
- BSRN : Baseline Surface Radiation Network 基準地上放射観測網
- DNS : Direct Numerical Simulation 乱流パラメトリゼーションを用いずに渦を直接解像するシミュレーション
- DOI : Digital Object Identifier デジタルオブジェクト識別子
- GAME : GEWEX Asian Monsoon Experiment アジアモンスーン エネルギー・水循環観測計画
- GAW : Global Atmosphere Watch WMO 全球大気監視計画
- GCM : General Circulation Model 大循環モデル
- GCOM : Global Change Observation Mission 地球環境変動観測ミッション
- GEWEX : Global Energy and Water Cycle Experiment 全球エネルギー・水循環研究計画
- GNSS : Global Navigation Satellite System 全球測位衛星システム
- GOSAT : Greenhouse gases Observing SATellite 温室効果ガス観測技術衛星 (いぶき)
- GOZCARDS : Global OZone Chemistry And Related trace gas Data records for the Stratosphere 全球成層圏オゾン化学・関連微量気体データセット
- GRUAN : GCOS Reference Upper Air Network 気候監視のための高層気象観測ネットワーク
- GTS : Global Telecommunication System 全球通信システム
- ICSU : International Council for Science 国際科学会議
- IGY : International Geophysical Year 国際地球観測年
- LES : Large Eddy Simulation 乱流パラメトリゼーションは用いるが、大きな渦は解像するシミュレーション
- LIDEN : LIghtning DEtection Network system 雷監視システム
- JAMSTEC : Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology 海洋研究開発機構
- JAXA : Japan Aerospace eXploration Agency 宇宙航空研究開発機構
- JRA : Japanese Re-Analysis 気象庁再解析データ
- LOTUS : Long-term Ozone Trends and Uncertainties in the Stratosphere 長期オゾン変化傾向・不確実性研究計画
- MAP : Middle Atmosphere Program 中層大気国際共同観測計画
- OSE : Observing System Experiment 観測システム実験
- OSSE : Observing System Simulation Experiment 観測システムシミュレーション実験
- PID : Persistent Identifier 永続的識別子
- PM2.5 : Particulate Matter 直径 $2.5\mu\text{m}$ 以下の微粒子
- RSME : Root-mean Square Error 平均二乗誤差
- SWOOSH : Stratospheric Water and Ozone Satellite Homogenized database 成層圏水蒸気オゾン均質データベース
- TRMM : Tropical Rainfall Measuring Mission 熱帯降雨観測衛星
- URL : Uniform Resource Locator 統一資源位置指定子 ウェブブラウザに入力する「アドレス」
- WCRP : World Climate Research Programme 世界気候研究計画
- WDS : World Data System 世界データシステム (ICSUの下に設立された科学研究データを扱う組織を構成員とする国際組織)
- WMO : World Meteorological Organization 世界気象機関
- WS-IVOS : Workshop on the Impact of Various Observing System on Numerical Weather Prediction 観測システムの数値予報へのインパクトワークショップ
- WWRP : World Weather Research Programme 世界天気研究計画
- WWW : World Weather Watch 世界気象監視計画

参考文献

- Davis, S. M., K. H. Rosenlof, B. Hassler, D. F. Hurst, W. G. Read, H. Vömel, H. Selkirk, M. Fujiwara and R. Damadeo, 2016 : The Stratospheric Water and Ozone Satellite Homogenized (SWOOSH) database : a long-term database for climate studies. *Earth Syst. Sci. Data*, **8**, 461-490.
- Froidevaux *et al.* 2015 : Global OZone Chemistry And Related trace gas Data records for the Stratosphere (GOZCARDS) : methodology and sample results with a focus on HCl, H₂O, and O₃. *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 10471-10507.
- 藤原正智, 2011 : 気候監視のための新しい高層気象観測ネットワーク GRUAN. *天気*, **58**, 679-695.
- Harada, Y., H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, S. Kobayashi, Y. Ota, H. Onoda, K. Onogi, K. Miyaoka and K. Takahashi, 2016 : The JRA-55 Reanalysis : Representation of atmospheric circulation and climate variability. *J. Meteor. Soc. Japan*, **94**, 269-302.
- Hov, Ø., D. Terblanche, S. Jones, P. M. Ruti and O. Tarasova, 2017 : Five priorities for weather and climate research. *Nature*, **552**, 168-170.
- 石橋俊之, 2013 : 観測システムシミュレーション実験

- (OSSE), 天気, 60, 831-832.
- Ishii, S., P. Baron, M. Aoki, K. Mizutani, M. Yasui, S. Ochiai, A. Sato, Y. Satoh, T. Kubota, D. Sakai-zawa, R. Oki, K. Okamoto, T. Ishibashi, T. Y. Tanaka, T. T. Sekiyama, T. Maki, K. Yamashita, T. Nishizawa, M. Satoh and T. Iwasaki, 2017: Feasibility study for future space-borne coherent Doppler wind lidar, Part 1: Instrumental overview for global wind profile observation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **95**, 301-317.
- 科学技術振興機構, 2017: ICSU-WDS, データリポジトリの認証機関 CoreTrustSeal を設立. 科学技術情報プラットフォーム フォーム, https://jipsti.jst.go.jp/johokanri/sti_updates/?id=10022 (2018.12.20閲覧).
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebita, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48.
- 国立国会図書館, 2017: 国際科学会議世界科学データシステム (ICSU-WDS) と Data Seal of Approval (DSA), データリポジトリの認証機関 “CoreTrust-Seal” を設立. カレントアウェアネス, <http://current.ndl.go.jp/node/34669> (2018.12.20閲覧).
- 工藤 玲, 内山明博, 2012: 地上日射量の世界的減光・増光. エアロゾル研究, **27**, 249-255.
- 南山泰之, 照井健志, 村山泰啓, 矢吹裕伯, 山地一禎, 金尾政紀, 2017: データジャーナル『Polar Data Journal』創刊の取り組み: 極域科学データの新たな公開体制構築に向けて. 情報管理, **60**, 147-156.
- 村山泰啓, 2013: 科学データ・マネージメントと新たなデータ共有・利用. 学術の動向, **18**(9), 61-63.
- 村山泰啓, 林 和弘, 2014: オープンサイエンスをめぐる新しい潮流 (その1) 科学技術・学術情報共有の枠組みの国際動向と研究のオープンデータ. 科学技術動向, (146) 12-17.
- Okamoto, K., T. Ishibasi, S. Ishii, P. Baron, K. Gamo, T. Y. Tanaka, K. Yamashita and T. Kubota, 2018: Feasibility study for future space-borne coherent Doppler wind lidar, Part 3: Impact assessment using sensitivity observing system simulation experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, **96**, 179-199.
- 佐藤芳昭, 2015: WMO 第5回観測システムの数値予報へのインパクトワークショップ. 数値予報課報告・別冊第61号, 気象庁予報部, 86-89.
- TF 地球科学研究高度化ワーキンググループ 編, 2017: 地球観測の将来構想に関わる世界動向の分析. 気象研究ノート, (234), 日本気象学会, 74pp.
- 渡邊 堯, 2012: ICSU 世界データシステム (WDS) について. 学術の動向, **17**(6), 11-15.
- WMO, 2017: WWRP Implementation Plan 2016-2023. https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/WWRP_IP_JN161711_final_April_2017.pdf (2018.11.29閲覧)
- 山本 孜, 1966: 世界気象監視 (World Weather Watch-WWW) について. 天気, **13**, 1-10.
- 山根省三, 伊藤耕介, 2012: 予報感度解析. 天気, **59**, 1039-1041.