

新しい観測のもたらすもの

廣 田 勇*

1. はじめに

この解説は2004年の秋季大会（福岡）に於いて行なわれた第33期理事長学術講演の要約である。これまでの3回の理事長講演では、衛星観測の意義、古典気象学の再考、突然昇温研究の歴史、の夫々について気象学のあるべき姿を考察する話を続けてきた（廣田，1999，2001，2003）。

本文はその一環として気象学の発展における様々な先駆的観測の持つ意義と重要性をあらためて強調し、今後の研究の推進に対するひとつの示唆を与えることを目的とする。今回もまた自分の専門分野である気象力学・大循環に関連したテーマに即して話を進めるが、その理念は気象学の他分野にもひろく共通する事柄なので、これから新しい研究を目指す新進研究者達に真剣に受け止めていただけることを期待している。

なお、はじめにひとつだけお断りしておくことがある。この解説は通常の総合報告とは性格を異にし、気象学の基本的理念を論じることを目的としているので個々の研究内容・成果の詳細には必ずしも深入りしない。前半の歴史的考察に関連した具体的な図は教科書等で既にお馴染みのものが殆どであり、逆に後半の最新のトピックスは未発表の論文の図をお借りしたものが多い。それゆえ本文では図は一切示さないが、より詳細な内容に関心のある読者は巻末文献リストを参照していただきたい。

2. 新しい観測の意味と意義

気象学には様々な側面があるが、その原点はやはり地球を取り巻く大気の中に生じる諸現象をしっかりと

捉えることに始まるものであることは言を俟たない。現在ではもう顧みられることの少なくなったギリシャ時代のアリストテレスの気象学（Meteorologica）が、夜空の流星を観察することに始まった歴史はきわめて教訓的である。気象学とは本質的に「大気現象学」なのである。

このことを現代の研究の筋道に沿って言い直すなら、まず測定・観測による現象事実の特性記述から問題が提起され、その理論的説明・解釈のなかから他の現象にも適用できる普遍的な概念が確立される。そして大気全体を通しての構造・振舞を認識する体系の構築へと発展してゆくことになる。

その意味で、気象学に関する各種の学術雑誌に数多く印刷公表される個々の研究論文が上述の研究の流れの中にどう位置づけられるかは、論文を書く側、読む側の双方ともに明確に意識されなければならない。

以下の本論では、この一連の流れにおける観測の意義に焦点を合わせる。ここで言う「新しい観測」の意味内容をとりあえず次の4通りに分類してみる。

(A) 測器・測定技術の新しさ

これは測器の原理上での新しさに加え、従前の測定技術の改良により、得られる測定値の精度や分解能を高めることである。気温・気圧・湿度・風速といった基本的な気象量に関しても観測の質を向上させることによってその中から新しい発展が生まれてくることは過去の研究例のなかに多々見られる。このことはたとえば風の測定における旧来のロビンソン風速計と超音波風速計の対比を考えれば明らかであろう。

(B) 測定対象量の新しさ

新しい測定技術の開発により、従前には測定の対象となり得なかった気象物理量・化学量のデータが得られることの意義もまた大きい。たとえば、大気上層の風速測定は以前は水平2成分のみであったのがレー

* 京都大学名誉教授，hirota@kugi.kyoto-u.ac.jp

2004年10月10日受領

2004年11月4日受理

ダー技術により鉛直風成分も直接測定可能になったこと、あるいはまた各種分光測定により大気微量成分が測られるようになったこと、などがその好例である。

(C) 観測領域の新しさ

これは従来の観測手段を用いて、それまで中緯度の陸上に限られていた観測を赤道域・極域・海洋上などに拡大すること、および上記(A)の新手段により観測高度領域を地上・下層大気から中層・高層大気へと拡充することなどを意味する。近年の衛星観測はまさにこの両者の特長を兼ね備えた好例と言える。

(D) 既存データの新活用

これは上記の(A)(B)(C)とはやや趣きを異にするが、従来ほかの目的で使われたデータセットを、全く新しい着想・発想で解析することも「新しい観測」として大きな意義を持っている。これは気象データ解析の最も基本である「現象の解釈・表現」につながるからである。気象学史上このことの好例としてはプランデスの天気図(1820)を挙げることができよう。それまで各地点で独立に測定され気圧絶対値の時間変化のみが着目されていた地上気圧測定結果を、空間分布という全く新しい観点から取り扱って低気圧の水平構造を明らかにした彼の解析は以後の総観気象学^{こうし}の嚆矢をなすものであった。

以下の節では、このような新しい観測がもたらした気象学の発展の有様を、20世紀における著名な実例と近年の発展の可能性について見てゆくことにする。

3. 20世紀気象学に見られる実例

3.1 大型気球による高層観測

様々な気象量の測定が地上から精々山上高地に限られていた19世紀までの限界を最初に打破したのが20世紀初頭のフランスおよびドイツにおける大型気球による大気上層の気温測定であった。この先駆的な試みから、気温の鉛直分布が高さ10 kmあまりまでは一定の減率で低下するが、ある高度以上では気温が一定となることが見出された。いわゆる成層圏の発見である。(たとえば Labitzke and van Loon, 1999参照)。

その後の観測の進展に伴い、成層圏は当初に考えられたような静穏な層ではなく、対流圏とは違った様々なスケールの運動の卓越する独特の領域であることがやがて知られるようになり、今日の中層大気力学の豊かな世界へと発展してきたのである。

この例は前節の分類からは(A)と(C)の両方を兼ね備えたものと言える。

3.2 ラジオゾンデの開発普及

初期の大型気球観測はあまりにも大掛かりであったがゆえに、いつどこでも簡単に行なえるものではなかった。それに対し、各地気象台の定常観測のため上層大気測定の目的で開発されたのが小型気球を用いるラジオゾンデである。

1930年代にはこの技術普及により、対流圏の鉛直構造がかなり良く知られるようになった。その成果が気象力学の発展に寄与した実例としては、たとえばノルウェー学派の低気圧立体構造解析(Bjerknes and Holmboe, 1944)が戦後のチャーニー、イーディによる傾圧不安定理論の確固たる基盤を与えたこと、あるいは1930年代後半のアメリカ大陸上空3000 mの高層天気図に見られる偏西風帯の蛇行と変動がロスビー波発見の直接の動機となったこと(Rossby *et al.*, 1939)、などを思い起こせば十分である。これらの例は上記(C)および(D)に分類されよう。

3.3 オゾンの分光観測

気圧・気温・湿度・風速といった基本的な気象量に加えて、大気の大気微量組成を測定することも気象学の新しい分野の開拓につながった。1920年代の英国で分光光度計を開発し大気オゾンを地上から測定することに成功したドブソンの仕事はその代表的なものである。

この観測成果は、チャップマンに代表されるオゾン生成理論の大きな裏づけとなったばかりでなく、ドブソン自身による下部成層圏オゾンの緯度高度分布の考察から、地球規模の物質循環(輸送)に関するいわゆる「ドブソン循環」という全く新しい概念を生み出した(Dobson, 1956)。これは同じく下部成層圏水蒸気分布の実測に基づく「ブリューワー循環」の提唱とならんで、今日の地球規模子午面循環論^{まき}の魁^きけをなすものであった。

ここにおいても、測器・測定・広領域データ取得・解析・解釈さらには認識体系の構築という(A)から(D)までのすべてを含んだ真の意味での観測の典型を見ることができる。

3.4 突然昇温とQBO・赤道波の発見

20世紀後半に急速に進展した中層大気力学の最大の動機は、Scherhag (1952)による成層圏突然昇温現象とReed *et al.* (1961)による赤道成層圏東西風準2年周期振動現象(QBO)の発見であると言ってよい。

前者は大戦後のベルリンにおける新型ラジオゾンデによる成層圏気温の高精度測定と解析がもたらしたものであり、後者はカントン島とナイロビのルーチン気

球データセットの全く新しい発想に基づく時系列解析の成果である。そしてまた、QBO現象の発見に触発された Yanai and Maruyama (1966) による赤道波の発見も、埋もれていた1950年代の西太平洋赤道域における原爆実験の際の気球観測データセットを丹念に掘り起こして全く新しい高度時間断面解析に活用した成果であった。

このようなタイプのデータ解析の価値は「コロンブスの卵」という意味合いもさることながら、上記 (C) (D) 型に属する新領域開拓の精神に裏打ちされたものとして高く評価されるべきである。

3.5 MAP 期間の新観測

1970年代末から80年代なかばにかけて展開された中層大気国際共同観測計画 (MAP) は、従来観測が不十分であったため「未知圏」と呼ばれていた成層圏中間圏の諸量を広域かつ高精度に観測することが第一の目標であった。そのため、種々の新しい測器・測定技術が開発され、力学のみならず組成に関しても急速な知見の進歩が見られた。

この関連での衛星観測についてはすでに第1回の理事長講演 (廣田, 1999) で詳しく述べたので、ここではもうひとつの代表例として京都大学グループが開発した MU レーダー (滋賀県信楽町に1984年設立) を挙げよう。

これは当時としては世界に類を見ない新しい技術によって風速の3成分を高精度高分解能で測定するものであり、成層圏や電離圏高度の重力波、乱流などに関する研究に大きな貢献をもたらした。成層圏大気重力波については、それまで中層大気の平均状態 (climatology) を知る目的で使われていた単発的なロケットデータにハイパスフィルターをかけて鉛直波長の短い擾乱成分 (慣性重力波) を検出した統計解析 (Hirota and Niki, 1985) があったが、MU レーダーによって時間的高分解能の風速3成分が測定可能になったことから分散関係式を介して伝播方向までも同定できるようになり、重力波の研究は一挙に進展した。

1990年代に入ってからには MU レーダーの連続観測から対流圏界面高度に卓越する中間規模東進波の発見 (Sato *et al.*, 1993) のような新しい成果も生まれた。

4. 近年の新しい観測

この節では、ここ数年の研究成果に見られる新しい観測の実例として、赤道大気、オゾンホール、大気重力波、の三つのテーマに関するものを取り上げ、それ

らもたらす問題提起と将来の発展の可能性について洞察を試みることにしよう。ただし、まえがきでも述べたように、ここで取り上げる三つの例が近年の成果のすべてではない。大気力学・大循環論以外の分野でも同様な意義を持つ新観測が多々あることを承知の上で話を進める。

4.1 赤道大気観測の新展開

京都大学宙空電波研究センター (RASC, 2004年度からは改組により生存圏研究所 (RISH)) では、1980年代からの MU レーダーの発展として赤道域大気の高精度連続観測を目的とした赤道大気レーダー (Equatorial Atmospheric Radar; EAR) を2001年に赤道直下のインドネシアのスマトラ島に設立し本格的な観測を開始している。(その概要は深尾 (2001) を参照のこと。)

赤道大気のは力学は前節に述べた1960年代の QBO と赤道波の相互作用論で大枠は理解されてきたが、従来は主としてルーチンゾンデ観測に頼っていたため時間および高度分解能の点で不十分であった。これに対し、時間空間高分解能の赤道レーダー観測からは、たとえば熱帯域のマデンジュリアン振動 (MJO) に伴う対流活動の上昇流による波動励起、赤道対流圏界面上部におけるケルビン波の碎波やそれに伴う乱流の発生、などの微細過程を背景風の変動と結びつけて議論することが可能となってきた (たとえば, Fujiwara *et al.*, 2003)。このような問題意識は、大気大循環論の新展開として1990年代中葉から急速に発展してきた「熱帯赤道域における対流圏一成層圏の交換過程」あるいは「赤道大気の下結合」の議論の中心をなすものである。その意味で、今後の赤道レーダー観測に対する期待は極めて大きい。

赤道大気研究に関するもうひとつの新しい展開は SOWER (Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region) である。その概要はすでに天気誌上で報告されているが (長谷部・塩谷, 2000)、これは文字通り、赤道域でオゾンや水蒸気などの大気組成の分布や変動を直接観測しようとするものである。

上述の赤道レーダーが主として力学過程を対象としているのに対し、この SOWER がめざしている大気微量成分の観測は対流圏一成層圏物質交換過程の議論にとって欠くべからざる相補的側面を形成するものである。たとえば赤道対流圏界面付近の水蒸気鉛直分布ひとつをとってみても、最近の SOWER のガラパゴス島における観測事実 (Fujiwara *et al.*, 2001) は従来の

教科書に掲載されているものとは非常に異なった様相を示している。これは取りも直さずブリューワー以来の地球規模成層圏水蒸気循環論に大きな一石を投ずることを意味している。さらにまた、赤道大気レーダー観測結果ともども、近年の最大の関心事のひとつである温暖化問題を含む気候長期変動解明の突破口ともなりうる可能性を秘めているとさえ言えよう。

4.2 南極オゾンホール問題の諸問題

1980年代のなかばころからクローズアップされてきた南極成層圏のオゾンホール問題は、その後、人為的に排出されたフロンがオゾン破壊の原因とされ、表面的には一応解決されたと受け取られるに至った。

しかし、大気化学の立場から見れば、観測が進めば進むほど、オゾン化学に関与する様々な微量物質の化学反応過程、さらにはその輸送メカニズムなど、未解決の問題が次々に指摘されてきている。それに加えて、2002年9月に起きた南極成層圏極渦の大規模崩壊の力学、逆にその翌年2003年春の極渦強化とオゾンホールの拡大等々、極域成層圏大規模力学の立場からも興味ある新事実が提起されている。

このような状況を突破する手がかりは、この場合もやはり新しい観測である。

国立環境研究所の主導によって行なわれた ADEOS 衛星搭載の ILAS による観測は、1号2号とも、不測の電気系統技術ミスによって観測期間がそれぞれ1年未満の短命に終わったものの、2002年12月打ち上げの ILAS-2は丁度2003年晩冬の南極オゾンホール強化の時期にうまく対応し、現在、観測データの詳細な解析が行なわれつつある（中島英彰ほか、2004）。

ILAS 観測の特長は、新しい分光測定とそのアルゴリズム技術を駆使して、オゾンのみならずメタンや硝酸など、オゾン化学に関与する様々な組成の水平分布・高度分布を精度よく把握するところにある。その詳細は近々学術誌に発表される予定の個々の論文に譲るが、そこから新しいインパクトの生まれることを期待して見守りたい。

その一方、衛星による広域観測に対応するものとして特定地点での地上観測もオゾン研究にとって不可欠である。南極昭和基地では第44次日本南極地域観測隊（越冬隊）が、オゾンホールの生成期・消滅期の7か月の長期に亘り、高高度気球観測を含むオゾンゾンデ集中観測を行なった。前半は国際共同観測の一環として行なわれた。このキャンペーンからは、2003年の晩冬から春にかけての南極域における地上から高度30 km

付近までの鉛直プロファイルの中にオゾン高度分布の時間変化に関する興味深い特徴が見出されている（佐藤 薫ほか、2004）。

4.3 大気重力波

1980年代における中層大気力学の発展の中にあってその作用の重要性が認識されてきた重力波の諸問題は、概念的には確立されたように見えるものの、その時間空間分布の多様性のため観測が最も困難な現象のひとつであった。

先にも述べたように、以前は単発的なロケット観測やルーチンの気球観測データの中から鉛直波長の短い擾乱として重力波成分を取り出す試みがなされていたが、精度および時間分解能の両面から見て不十分と言わざるを得なかったのが実情である。観測分解能の上では極めて優れている MU レーダーといえども、測定地点が中緯度の一点のみという制約がある。そのため、重力波活動・力学特性の全球分布や季節変化、つまり climatology は20年前の Hirota (1984) による極めて素朴な記述の域を出るものは無かった。ようやく近年、GPS 気象学の一環として電波遅延を利用した大気密度の測定から、成層圏重力波の地球規模分布が把握されるようになった（Tsuda *et al.*, 2000）。この解析成果は特に熱帯域における重力波活動と対流圏 ITCZ との間の対応関係をグローバルな視点から明確に示した点で高く評価されている。

しかしながら、GPS による重力波解析は鉛直分解能が十分とは言えないため広いスペクトル特性を持つ重力波のうちの一部分しか捉えていないのではないかとこの危惧に加え、地球全域のうち、高緯度の観測に難点が残されていた。

従来、重力波観測の最も立ち遅れていた極域に関し新しい観測の挑戦を試みたのが、国立極地研究所佐藤 薫氏の指導のもと、南極昭和基地で越冬し（43次隊）ゾンデ強化観測を行なった吉識宗佳氏の仕事である。

彼は他の越冬隊員の協力のもと南極の過酷な状況のなかで3時間毎（1日8回）10日連続という特別観測を3か月毎、計四度に亘って行い、そのデータを用いた時間高度高分解能の詳細な解析により上部対流圏下部成層圏重力波の特性に関する幾つかの新しい成果を示した（吉識、2004）。特に重力波の活動度と背景風の関係について、従来の中緯度観測では知られていなかった特性、たとえば周期と位相速度の対応関係に明瞭な季節変動が見られることを初めて明らかにした。

そもそも大気重力波は、その成因や伝播特性が背景

場の異なる領域・季節で様々であることを考えると、これらの観測による新しい成果は、間違いなく数値モデリングを含む今後の重力波力学の研究に対する大きな指針となることであろう。

この路線を更に延長拡大する試みとして、いま国立極地研究所では、重力波研究で優れた経験と実績を持つ佐藤薫氏が、京都大学のMUレーダー・赤道大気レーダーの成功をバックに、わが国の第3世代レーダーとも言うべき新しいレーダーを昭和基地に設置する計画(PANSY)を進めている(佐藤 薫ほか, 2004)。その前途は決して容易なものではなからうが、「新しい観測は必ず新しいエポックを生み出す」との信念で邁進されることを切に願っている。

5. 理論数値モデルへのインパクト

近年の大気科学の進展のなかで、理論・数値モデルの果たす役割ももちろん大きい。扱う内容も地衡風スケールの力学のみならず雲物理や化学過程をも含んだ多様なものが数多く見られる。

しかしながら、これらのモデル計算にとって何よりも大切なことは、その発想・問題設定において観測事実の示す大気特性が明確に意識されていなければならない、ということである。それは単に問題設定の出発点にとどまらず、数値モデル計算結果の正当性もまた観測事実によって裏付けられるという検証も重要である。

その実例として、1960年代の台風発達理論のなかから生まれたいわゆるパラメタリゼーションの概念は決して思弁的に作られたものではないことに注意する必要がある。それは(たとえ当時の観測が不完全なものであったにせよ)あくまでも現実大気中の積雲対流の実態を踏まえたものなのである。同様に、現在の力学数値モデルで、時間空間分解能の制限のためサブグリッドスケールの表現として用いられている重力波のパラメタリゼーションも観測により確かめられている波動特性を十分に踏まえたものでなければならない。

現在の数値計算技術の優秀性を十分に認めた上で、敢えて苦言を呈するなら、同一の対象・現象・過程を扱った複数のモデル計算の結果が互いに相い異なっている場合、それをmodel dependentと呼ぶことが単なる言い訳や逃げ口上であってはならない。不完全な計算手法を内蔵したままのモデルで、全体の巨視的な量(たとえば平均気温や全降水量など)を観測値と一致させるため物理過程を無視したチューニングを行うなど

という愚行や、あるいは大型高速計算機が利用可能になったからというだけの動機で明確な問題意識のないまま闇雲に格子点を細かくした計算を行なうような思想性の乏しい作業を見るにつけ、いっそうその感を深くする。

このような事態を打破するためには、まずやはり、数値モデリングのあり方に大きなインパクトを与えるような新しい優れた観測結果が提示されねばなるまい。本文で述べた観測の意義はまさにこの点に尽きる。

6. おわりに

すでにお読みいただいた方もあろうが、この理事長学術講演で強調した理念は、数年前に上梓した「気象解析学」(廣田, 1999)で一貫して述べた思想と軌を一にしている。そのテキストの最終章のタイトルに選んだ「ミネルヴァの梟」の含意を各自でもう一度お考えいただければ幸いである。

謝 辞

本文の草稿に対し貴重なコメントを寄せて下さった佐藤 薫、内藤 陽子の両氏ならびに天気編集委員長新野 宏理事に厚くお礼申し上げます。また、講演に際し未発表論文を含め多くの図の使用を御快諾下さった学友諸氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- Bjerknes, J. and J. Holmboe, 1944 : On the theory of cyclones, *J. Meteor.* 1, 1-22.
- Dobson, G. M. B., 1956 : Origin and distribution of the polyatomic Molecules In the atmosphere, *Proc. Roy. Soc.*, A236, 187-193.
- Fujiwara, M., F. Hasebe, M. Shiotani, N. Nishi, H. Voemel and S. Oltmans, 2001 : Water vapor control at the tropopause by the equatorial Kelvin waves observed over the Galapagos, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3143-3146.
- Fujiwara, M., M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, T. Horinouchi, and S. Fukao, 2003 : Turbulence at the tropopause due to breaking Kelvin waves observed by the Equatorial Atmospheric Radar, *Geophys. Res. Lett.* 30, 1171, doi : 10.1029/2002GL016278.
- 深尾昌一郎, 2001 : 始動した赤道大気レーダー。期待と展望, *天気*, 48, 851-856.
- 長谷部文雄, 塩谷雅人, 2000 : SOWER について, *天気*, 47, 47-51.
- 廣田 勇, 1999 : 「気象解析学—観測データの表現論」,

- 東京大学出版会, 175pp.
- 廣田 勇, 1999: 新しい現象論—衛星観測のもたらしたもの—, 天気, **46**, 5-10.
- 廣田 勇, 2001: クラシック気象学—大気力学の発展に見る温故知新—, 天気, **48**, 5-10.
- 廣田 勇, 2003: ベルリン現象から50年—突然昇温研究の現代的意義—, 天気, **50**, 5-15.
- Hirota, I., 1984: Climatology of gravity waves in the middle Atmosphere, J. Atmos. Terr. Phys, **46**, 767-773.
- Hirota, I. and T. Niki, 1985: A statistical study of inertia-gravity waves in the middle atmosphere, J. Meteor. Soc. Japan, **63**, 1055-1066.
- Labitzke, K. and H. van Loon, 1999: The stratosphere-phenomena, history, and relevance, Springer-Verlag, 179pp.
- 中島英彰ほか, 2004: ILAS-II Ver. 1.4データ質検証とそれを用いた2003年南極オゾンホール解析. 日本気象学会秋季大会予稿集 C119.
- Reed, R. J., W. J. Campbell, L. A. Rasmussen and D. G. Rogers, 1961: Evidence of a downward propagating annual wind reversal in the equatorial stratosphere, J. Geophys. Res., **66**, 813-818.
- Rossby, C. G. and collaborators, 1939: Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacement of the semi-permanent centers of action, J. Mar. Res., **2**, 38-55.
- Sato, K, H. Eito and I. Hirota, 1993: Medium-scale traveling waves in the extra-tropical upper troposphere. J. Meteor. Soc. Japan, **71**, 427-436.
- 佐藤 薫ほか, 2004: 第44次日本南極地域観測隊によるオゾンホール観測. 日本気象学会秋季大会予稿集 D159.
- 佐藤 薫ほか, 2004: 南極昭和基地大型大気レーダー計画 (PANSY) の現状. 日本気象学会秋季大会予稿集 D160.
- Scherhag, R., 1952: Die explosionartigen Stratosphärenwärmungen des Spätwinters 1951-1952, Ber. Deut. Wetterd., **6**, 51-63.
- Tsuda, T., M. Nishida, C. Rocken and R. H. Ware, 2000: A global morphology of gravity wave activity in the stratosphere revealed by the GPS occultation data, J. Geophys. Res., **105**, 7257-7273.
- Yanai, M and T. Maruyama, 1966: Stratospheric wave disturbances propagating over the equatorial Pacific, J. Meteor. Soc. Japan, **44**, 291-294.
- 吉識宗佳, 2004: 極域下部成層圏における大気重力波特性と背景場の影響に関する観測的研究, 京都大学理学研究科学位論文, 107pp.

Scientific Significance of New Observations of the Atmosphere

Isamu HIROTA

President of the Meteorological Society of Japan, Professor Emeritus of Kyoto University.

(Received 10 October 2004 ; Accepted 4 November 2004)