

# 天 気 予 報

## —その学問的背景と実際の側面—\*

股 野 宏 志\*\*

### はじめに

予報官は詩人である。予報とは、現実が足音を響かせながら近づいて扉を叩き、その姿を見せるまでの間奏的な詩の連続と言えよう。湧き出るように作られる詩のまにまに自然が振舞うとき、その詩はすばらしいと讃えられる。しかし、神の如きホメロスにも駄作があるというから、すばらしい詩ばかりを作り続けることは非常に難しい。

気象学の発達は、いろいろの新しい分野の広がりを促し、そのため天気予報の分野へ進む若い気象学者が少なくなっていることを J. ビヤークネスが憂えたのは10年程前のことである。天気予報という実際的な分野では、予報の当たり外れが問題とされ、毎日が試験のようなきびしさを持っている。しかし、このきびしさも、天気予報の将来的発展を托す夢があってこそ耐えられるものである。つぎの時代を背負って立つ若い人達に、夢と希望を持って引継いでもらえるような将来像が、天気予報の分野にも新しい時代の流れを反映しながら確立されることを望みたい。

いっぽう、社会全般を見ると、気象知識の普及が目覚ましく、かつては専門家にのみ限られていた事柄も、今ではかなり日常化し、天気予報もその例外ではない。新聞の中学生向き学習欄にも、天気予報について相当専門的な問題が掲載され、生徒諸君から気象台への問い合わせもしばしばであると聞いている。天気予報に関する一般向けの図書も店頭の数多く見られるのはすでに周知のとおりである。

最近では、観測や通信の分野で、最新の工業技術が積極的に導入され、10年前とは比べようもないほど近代化が進んでいる。その結果、天気予報も含めて、広く気象に関する情報を大量かつ迅速に処理して、それぞれの利用

に適時提供するための総合システムが実用の域に達している。

天気予報の利用についての一部の分野では、その情報処理が従来の意味での気象専門家の手を離れ、独り歩きを始めている感もある。もちろん、一部では、依然として、因襲的な感覚でしか天気予報が理解されていないように見受けられるふしもある。

この解説は、こうした状況の中で、むしろ予報の専門家でない方々に、天気予報の本質を理解していただくことを主眼とし、科学的天気予報が始まってから120年余の間における天気予報の近代的発展と現状および将来的展望をベリパトス風に述べたものである。天気予報について将来への夢を讀者各位がそれぞれ自由に築いていただく機会ともなれば望外の幸である。

### 1. 明夜の陰晴はかりがたし

#### —天気予報と通信—

月々に月見る月は多けれど、月見る月はこの月の月。昔から、このように、旧暦の8月15夜の月は1年中でも澄んで美しく、中秋の名月と呼ばれて、日本人の繊細な詩情を刺激してきた。俳句の世界では、当夜、晴れば名月（明月）、曇れば無月、雨ともなれば雨月と呼んで、それなりの句趣を味わうのを常とした。しかし、名月に越したことはない。やはり、当夜の天気は気にかかる。「奥の細道」にも8月14日から8月16日（元禄2年、1689、旧暦）にかけて、敦賀での3日にわたる有名な記述がある：

芭蕉は、中秋の名月を月の名所として知られる敦賀で見たいものと、前日の夕方に敦賀に到着。その夜はよく晴れ、待宵の月の光は清かった（月清し、遊行の持てる砂の上）。「明日の夜もかくあるべきにや」と尋ねると、宿の主人は「越路の習い、なお明夜の陰晴はかりがたし」と答えた。そして、残念にも宿の主人の言葉どおり、15夜の月は雨月となった（名月や、北国日和定めなき）。皮肉にも翌16日はまた晴れ、そこで種の浜まで舟を走らせ、秋の夕暮れの寂しさを満喫（寂しきや、須磨に勝ち

\* Weather Forecasting  
—Its Philosophical Background and Practical Aspect—

\*\* H. Matano, 気象庁電子計算室。

たる浜の秋)。

俳句の宗匠と呼ばれる人達の手許には、各地から、空模様を含めたいろいろの句便りが寄せられたことであろう。しかしながら、それらを地図上に記入し、天気分布やその変化を求めるといことは誰も考えつかなかった。名月よし、無月よし、雨月も苦しからずの世界では、そういう考えは無粋とすべきかもしれない。しかし、本当は、当時の通信事情がそのような考えを育てるには程遠いものであったからである。

元禄といえば忠臣蔵。その発端は松の廊下事件。この衝撃の重大ニュースを一剎も早く国許の大石良雄に報ずるのに、早水藤左衛門らは、江戸から赤穂まで175里を4日半要している。これに匹敵するものとしては、元禄時代から約100年前に一つの記録がある。天正10年(1582)、本能寺の変が起こった。この天下の一大事を、当時、備中で毛利軍と対戦し、備中高松城を攻めていた羽柴秀吉に急報するため、京都を発った密使は、備中高松までの70里を1日半要している。

チョンマゲ時代の通信速度の限界はだいたいこの程度、つまり1日に40里か50里、というところであろう。とすれば、なにもわざわざ早打ちにかけることもない一般庶民の手紙など、非常にのんびりしたものであったろう。俳句の宗匠達の手許に寄せられる句便りなどは、バラバラと、時には忘れた頃に、届けられたに違いない。

天気分布を地図上に表現するなどの発想は、通信技術が電信時代に入る19世紀になってからのことでしかなかったのかもしれない。

## 2. 嵐が遠くからやって来る

### ——総観的実体の発見——

1854年11月14日、クリミア半島を襲った暴風雨は、当時、セバストポール要塞の攻撃に参加していたフランスの最新鋭の戦艦アンリー4世号を沈没させた。ナポレオン3世にこの暴風雨の調査を命ぜられたパリー天文台長のルヴェリエは、11月12日から16日にかけての気象資料をヨーロッパ各地の観測所から送ってもらい、これらを地図上に記入して検討した結果、

この暴風雨はヨーロッパ各地で同時に起こったものでもなければ、黒海に突如として発生したものでなく、遠くスペイン付近からはるばる地中海を経て黒海へやって来たものである、

という驚くべきことを発見した。そこで彼は、もし、この種の天気図が毎日作られていたならば、遅くとも前日には黒海にいる艦隊に対し「嵐がやって来る」旨を警

告することができた、と結論し、気象警報組織の必要性を建議した。フランス政府は彼の建議を採用し、気象の観測網と通信網の整備に着手した。この網の目はフランスだけでなく、ヨーロッパ全土に広がった。フランスが天気図を定常的に毎日発行する最初の国となったことは言うまでもない。

それまで主に人間の眼の及ぶ範囲の中でしか理解されなかった大気中の現象が、空間的にかかりの広がりを持った構造体として天気図上で把握され、しかも、それがその構造を維持しながら長い距離を移動する実体として、天気図上で追跡され、しかも、将来の移動について補外できるものとして認識されたことは画期的な発見である。天気図上で、天気図を通して、物事を考えることを総観というが、ここで「嵐が遠くからやって来ること」が総観的に発見された訳である。そして、ルヴェリエは、暴風雨が総観的実体であることの発見者として、近代の科学的天気予報に黎明をもたらした栄光を負うことになった。しかし、彼の発想の背景に、通信技術が電信時代を迎えたという事情が大きく控えていることは否めない。つまり、遠距離の情報が短時間で収集でき、予報という実用性の枠内で、天気図が作成できる下地があったからであろう。

いっぽう、ルヴェリエといえば、「海王星の予言的発見者」として、天体力学に栄光をもたらせた人である。彼は、当時、この名声を担って、パリー天文台長の職にあった。その彼が「総観的実体の発見者」として、総観気象学の開祖ともなったことは、天気予報の発展にとって、極めて暗示的であり、また象徴的である。

ナポレオン3世は、遠い宇宙の彼方にある未知の星の存在すら予言できたルヴェリエにとって、この身近な地球上の嵐のことなどやさしいことだろう、と考えた。これもまた、ある意味で、極めて象徴的である。

## 3. 天上影は替らねど

### ——天文と気象——

天文のことは遠くて神秘的、これに比べて気象の方は身近で日常的、という認識はかなり一般的である。したがって、天文予報の正確さに比べ、気象予報のルーズさが不思議がられるのも無理はない。しかし、生活感覚の時間スケールで測ると、気象予報が天文予報のような正確さに達することは決してない。両者はもともと比べられるべくもない異質のものなのである。両者の違いは、質点力学の世界と流体力学の世界との違いというよりも、予報の対象の知覚的な違いとでも言えようか。天文

予報の対象は、むしろ物自体で具体的であるのに比べ、気象予報の場合は、部分的な状態で、むしろ抽象的である。例えばの話。

「天の原、ふりさけ見れば春日なる、三笠の山に出でし月かも」と阿部仲麻呂が大陸で望郷の感をこめて眺めた月も、「心にも、あらでうき世にながらば、恋しかるべき夜半の月かな」と三条院が病苦と不遇を嘆いて眺めた月も、月そのものには変わりはなく、現在も変わらぬ千古の光を投げかけている。しかし、室戸台風と伊勢湾台風とは、ただ大気の部分的な運動が激しい渦巻き状態を呈しているという点で同じというだけのことで、そのもの自体は同じものがあちこち動きまわって何年ぶりかでまたやって来たという訳ではない。台風やその他の暴風雨は、せいぜい半月位の寿命で、「かつ消え、かつ結びて、久しくとどまりたるためしなき」うたかたのようにはかない。まさに「天上影は替らねど、榮枯は移る世の姿」である。

日常生活的な感覚にもかかわらず、天文の世界が形而下的で、気象の世界の方がむしろ形而上的であることは、天気予報の問題の一般的理解を非常に困難にしているように思われる。

#### 4. ペガサスがナスカの地絵を見る如く

##### —天気予報の ABC—

現在の天気予報では天気図が欠くことのできない重要な役割を果たしている。それは、総観的背景の中で天気の変化を予測するということから、天気予報の近代化が始まったからである。そこでは天気予報は2つの局面を持っている。1つは総観的背景を把握し、それを予測するという局面である。もう1つはそのような総観的背景の中で対象とする地域の天気の局地性を把握し、予測された総観的背景に対応して局地性を加味し、その地域にふさわしい天気を予報するという局面である。

各地で一定の時刻ごとに観測された気象要素を地図上に記入し、これら気象要素の空間分布を所定の形式で表現したものが天気図である。この場合、記入された各地点の観測資料は周囲の地点のものと比較され、また、前の時刻のものとも比較され、さらに、全体に対する部分としても比較される。このようにして形成される気象要素の空間分布が表現する大気の状態は、天気図上で識別され、時間的にもその移動や変化が追跡できる程度のもので、かなり大きな規模のものである。しかし、ある局地の天気は空間的にも時間的にも変動性に富み、また、小さい規模の現象にも左右されやすい。したがって、大規模な

状態を表わしている天気図から果たして局地の天気を予報することができるのだろうかという疑問が生ずるのは当然と言えよう。

局地の天気は不規則にせわしく変化し、その変化幅もかなり大きいことがある。しかし、この変化は、大勢的に見ると、ゆっくりした変化を基調とし、その上に重合したものであることがわかる。さらに、これらの変化は決して無関係ではないことも知られている。そして、ゆっくりした変化は天気図から判断される天気の変化に対応するものなのである。昔、天気図が導入されるまでは、ゆっくりした変化を把握することができず、せわしい変化だけが浮かび上がって十分な予報ができなかった。「嵐が遠くからやって来る」という総観的実体の発見の意義がここにある。現在は、気象衛星から送られてくる雲分布の写真によって、局地で観測された雲が総観的にどのような位置づけになっているかを、誰もが実感的に容易に理解することができる。このような手段がない時代、人間の眼の及ぶ範囲での大気の映像は「針の穴から天を覗く」の類と言うべく、この意味でも天気図の果たす役割の大きさが理解されよう。

天気図はとかく図形的なものとして扱われやすい。しかし、天気図は気象要素の空間的分布、すなわち、場を表わしているのである。もし、物理量がある程度の保存性を持っているならば、場の局地変化は移流効果によって定義される。簡単に例えれば、上流に寒気があれば、下流の地点の気温は下がるということである。これは天気図の持つ流体力学的意義として極めて重要なことである。数値予報として知られる最新の予報技術の基礎にも連なるものとして理解されねばならぬことである。

ゆっくりした変化に対応し、天気図上で判断されるものを総観系と呼ぶが、総観系自体の変化もまたゆっくりしたもので、急に発生したり消滅することもない。一定時刻ごとに作成される一連の天気図から、総観系の移動を追跡することができるのである。したがって、変化傾向を考慮しながら外挿することが可能となる。天気図上でラグランジュ的に追跡し外挿される総観系に対応して、ある地点での天気変化をオイラー的に推定することにより、局地の天気が予測できる。しかし、この場合の天気は総観性のもので、天気予報としてはその局地にふさわしい局地性を加味しなければならない。

天気図を作成する過程で、局地性を持った各地点の観測値は総観化される。いっぽう、予報としては総観性のもを局地化する必要がある。たとえば、風の場合、総

観性の風、普通これを場の風と呼ぶが、これと局地風とは全く風向が逆のことがある。海陸風などその好例と言えよう。場の風が強いと局地風が隠されてしまうこともあれば、かえって強まることもある。このように局地性はかなり複雑であるが、統計的にはかなりはっきり把握されていることが多い。局地性を総観化する際に検討された事柄を考慮し、統計的に知られた事柄を採用することによって、総観性を局地化することができる。

天気図を作成することは、気象要素の空間分布を確定することである。気象要素の間には一定の物理的関係があるので、諸要素の空間分布はそのような関係を保持していなければならない。天気図が大気の立体構造を表現するとはこのようなことを意味している。この場合の立体構造はもちろん総観系のものであり、これに対応する天気は総観性のものである。しかし、総観性であっても、これから局地性を推定することができる。たとえば、雲がでやすいとか、山間部でわか雨が降りやすいとか、あるいは霧が出やすいとかの類である。これは大気の構造から期待される局地的な現象と言えよう。

予報官が天気図を描くという作業には、総観的背景の把握と予測はもちろん、局地性の問題まで含まれており、天気予報の殆どすべてが、天気図にかかっていると見てよい。南米の古代遺跡にナスカの地絵と呼ばれるものがある。高い上空から眺めて初めてその巨大な全体像がわかるという不思議な地上の文様である。天気図によって予報官はあたかもベガサスがナスカの地絵を見る如く、巨大な大気の振舞いの全体像を眺望しながら、しかもその中で占める局地部分の位置づけを考察して、対象地域の天気予報を行なっている訳である。

このように天気図を介した外挿の手法に基づく予報法は、24時間程度の予報期間に対しては、かなり有効であるとされ、広く世界的に慣用され親しまれている。

一般に予測の原理として知られているものは、ある状態が安定してそのまま続くと仮定して、その状態を外挿するものである。そのためには過去から現在までの状態が与えられ、その振舞いが知られていなければならない。過去は未来の鏡とか、過去は未来の予言者とか言われるものに通ずるものである。しかし、過去が未来を語るならば、未来を案ずるものはないであろう。とはいえ、短い期間に対しては、外挿は最も有力な方法である。予測の原理はつぎの5種に大別され、実際には最も効果があるように組み合わせられて使用される：

(1) 持続法 現在の状態がそのまま続くと考え、現在

値を予測値とするものである。余り効果はないが予測精度の基準に用いられる。

- (2) 傾向法 現在までの変化傾向がそのまま続くと考え、その傾向を外挿するものである。短い期間に対しては有効とされ、とくに変化傾向の2次傾向まで考慮する場合が多い。このため過去資料はこれらが判断できる期間が必要である。
- (3) 週期法 週期がそのまま続くと考えその週期を外挿するものである。週期の変化傾向を考慮する場合もある。このため過去資料はかなり長い期間が必要である。
- (4) 関連法 ある事象と他の事象との間の統計的関係または物理的関係においてタイム・ラグがある場合、これが続いて保持されると考え、いわば前兆として利用するものである。
- (5) 相似法 ある事象についてモデルを設定し、モデルで保証される予測性がその事象にそのまま適用されると考え、モデルで予測される振舞いをもって代用するものである。数値予報がその好例である。

いずれの方法も適用限界があり、それぞれの前提条件が満たされていなければならない。これらの判断は非常に難しいことである。上記の方法は局地の観測資料を用いる場合には、その局地での予測にも適用されるが、総観的背景の予測の場合には、前線系や気圧系のような総観系の移動や変化の予測にも適用されるものである。

実際の子報作業はもっと複雑であるが、多かれ少なかれここで述べた事柄が主体となっている。総観的背景の把握から局地の天気を予報するまでの過程をリアル・タイムで処理するためには、予報官に高度の専門的知識と豊富な実務の経験が必要とされる。人間わざとは思えない仕事振りではあるが、そのためにこそ神秘的な妖しさをもって尊敬されることもあれば、ドンキホーテ的な空しさを持って耐えねばならぬこともある。

物事を分析し、それを説明する場合には、専門家の知識と経験がものをいう。しかし、当たり外れだけがすべての場合には、専門家の知識と経験が冗談にも及ばぬことがある。これはヒポクラテスも嘆いたというから、やむを得ないことかもしれない。

さて、総観的背景の把握と予測についての従来的な総観的手法も、ある程度予測期間が長くなると限界があることはすでに述べた。過去は未来を語らずとは力学の原理である。天気図が持つ流体力学的意義に照らしても、

大気の現象に力学の方程式を直接に適用し、天気予報を力学的に行なうのが最も正統的な道であるのは言うまでもない。過去とは関係なく、現在と未来を一義的に結びつけるものが力学の法則である。数学と力学の見地から考察した天気予報の問題を V. ビヤークネスが提案したのは今世紀の初めてであるが、力学的方法による天気予報が数値予報として実用化するまでには半世紀以上の年月を要している。これは天体力学の勝利者であるルヴェリエが開いた総観気象学が力学化するまでの道のりでもある。

### 5. アヴェ・マリア (グノー)

—長波の発見—

高層観測網が世界的に整備されるに伴って、大気の立体構造を直接知ることができるようになった。高層天気図では地球を取り巻いて蛇行しながら流れる大気の波形パターンが卓越し、地上天気図で見慣れた前線系や気圧系の形はすっかり影をひそめている。しかし、両者は決して無関係でなく、高層大気の運動系は地上の運動系や天気系の製造者であり、運搬者であること、そして、これらの消長を支配するものであることが認識された。その結果、高層天気図は地上天気図にも増して重要視されるようになった。

高層大気の波形的な流れはいろいろの波長を持った波から構成され、必ずしも規則正しい単純な波形を示してはいない。しかし、その中で、数千キロメートルの波長を持った波は比較的規則正しく、全球的な規模で地球を取り巻きながら進んでいることがロスビーによって発見された。ロスビーは、この波が絶対うず度を保存しながら、波長、コリオリ・パラメータおよび代表的な風速を因子とした一定の波速で進行することを明らかにした。この波を長波、または、発見者の名にちなんでロスビー波と呼んでいる。ロスビーによる長波の発見は、総観気象学の力学的発展を促す契機となった。同時に、従来は限られた範囲の中でしか扱われなかった理論気象学、とくに、気象力学が総観的発展を遂げる契機ともなった。この見地から長波の発見は画期的なものと言えよう。

このような発見は決して数式をいじくっているだけでは生まれなだらう。おそらく、自然の振舞いに対する深い美意識のなせるわざによるものと思われる。

グノーはバッハのピアノ曲をひいている時、その曲があたかもそのまま何かの旋律に対する伴奏のように感じ、湧き出るような感興のまにまにその旋律を書きとめて作ったのがあの美しい旋律の独唱曲アヴェ・マリアで

ある。バッハの原曲はピアノ曲の旧約聖書と呼ばれる平均律クラヴィア曲集の最初にあるハ長調前奏曲であるが、比較的短い周期で繰り返されながら進行する分散和音の楽句から構成されている曲の中にあのゆるやかで美しい旋律が秘められていた訳である。グノーはそれを発見したと言えよう。いろいろの波長の波から構成され、やや複雑な波形をして進行する大気の流れの中から、ゆっくりと一定の波速で進行する長波を発見したロスビーにグノーを見る思いがする。

### 6. G線上のアリア

—準地衡風モデル—

大気中には大別して2種の異なる物理的性質を持つ波が存在する。一つはおそい波で、代表的な風速と同じ程度の速さで東に進む波である。もう一つははやい波で、おそい波の速さより1桁大きい速さで東西に進む波である。長波はおそい波に相当する。はやい波に相当するものとして地球回転による慣性と重力を復元力とする波、すなわち、慣性・重力波がある。積雲対流のような現象は重力波に属する。長波のような総観規模現象を対象とする場合には、はやい波は雑音に当たる。運動方程式の一般解はおそい波もはやい波も含んでいるので、雑音が卓越して、結果的には雑音を予報することになる。リチャードソンは V. ビヤークネスが提案した力学的方法による天気予報を受けて、これを実際に数値的方法で試みたが、その結果は完全に失敗であった。失敗の原因は彼が雑音に気づかず、雑音を計算してしまったことにある。リチャードソンの失敗を繰り返さないためには、雑音が卓越しないように工夫しなければならない。最も簡単な方法は雑音をふるいにかけてあらかじめ除去してしまうことである。そのためには気象現象を支配する諸要因を量的に比較し、それぞれの規模に応じて、その本質を最も端的に記述する方程式系を確立することが必要である。大気中にはさまざまな大きさや寿命を持った擾乱が存在していて、それぞれ固有の物理的性質を持っているという考えをスケール概念と呼ぶ。この考えはチャーニーによって導入され、数値予報発展の基礎となったものである。

長波の場合、その物理的特性をまとめるとつぎのようになる。

鉛直方向には静力学的平衡を、水平方向には地衡風の平衡を保持しながら、曲率の比較的小さいなだらかな波形をなし、谷の前面では僅かな上昇成分、谷の後面では僅かな下降成分を持った殆ど水平な流れをしている。流

れに沿った方向での風速の変化は、流れに直角な方向での風速の変化に比べると非常に小さい。この大規模な波動擾乱は、谷の前面で南側の暖気を上昇させ、後面では北側の寒気を沈降させることによって、位置のエネルギーを運動のエネルギーに変換させる傾圧不安定の機構によってしだいに発達する。

これらの物理的性質はロスビー数やリチャードソン数などのパラメータによって量的に評価され、力学の方程式の各項の大きさの程度を見積もる基準に用いられる。予報方程式としては時間変化の項が他の項と同じ大きさになることが望ましい。運動方程式に回転の演算を施して得られるうず度方程式の各項の大きさの程度を、長波の力学的特性に照らして評価し整理すると、時間変化の項が他の項と同じ大きさのものになる方程式が得られる。これは、長波の予測に適した最も基礎的な方程式である。

総観的背景の予測に関し、長波のような規模の大きい現象だけを対象とし、それより規模の小さい現象は雑音としてあらかじめ消しておくという方式で考えられた数値予報のモデルをフィルタード・モデルと呼ぶ。はやい波とおそい波が生ずるのは、風の場と気圧の場との間にアンバランスが生ずるからで、その場合、はやい波は高速高周波の波として分散的に周囲へ伝播し、後にゆっくり変化するおそい波が残る。このおそい波は風の場と気圧の場との間に地衡風のな平衡関係を保持しながらゆっくり変化する。もし、風の場と気圧の場が常に地衡風のな平衡関係にあるならば、そこにはアンバランスが生じないので、はやい波が発生する余地がない。風の場と気圧の場との間に常時的な地衡風の平衡関係を設定することにより、雑音をふるいにかけ、長波だけを予測の対象としたモデルを準地衡風モデルと呼ぶ。数値予報の最も基礎的なモデルである。大気の物理的立体構造とそれに対応する総観的気象構造を長波を介して理解する上で非常に重要な意義を持っている。

風を地衡風で近似させると発散は零となるので、連続方程式から鉛直速度を求めることができない。そのため、運動方程式と熱力学方程式から鉛直速度の空間分布を与える診断方程式を誘導する。この方程式がオメガ方程式である。これによる鉛直速度の空間分布は傾圧不安定の概念による長波の総観的構造とよく一致している。うず度と発散と鉛直速度の空間分布においてそれらが織り成す傾圧不安定波動の力学的構造は、気象力学の総観的發展の圧巻として感動を持って賞味されるべきである

う。長波だけを対象として、かくも華麗に総観的背景の予測と解釈を与えることは在来の総観的手法では不可能に近いことである。準地衡風モデルは、気象力学の天気予報における学問的成果として、不滅の輝きを放ち続けることであろう。

バイオリンには太さの違う4本の糸が張ってある。細い方から順にE線、A線、D線、そしてG線と呼ぶ。G線が一番太い線である。バッハは、初めから終わりまで、このG線1本だけでひく曲を作った。「G線上のアリア」である。1本の弦だけでひき、しかも音楽効果を高めるためには相当すぐれた演奏技術が必要であることは言うまでもない。アリアとはもちろんイタリア語であるが、英語のエアに相当する。原意は「G線だけでひくふし」ということであろうが、G線に触れる空気だけが振動していると解しても不思議ではない。低く、静かに、ゆっくりと流れるこの美しい名曲を準地衡風モデルに捧げたい。そういえば地衡風の頭文字はGである。地衡風の関係を満たしながら、僅かな鉛直運動を伴い、ゆっくりと、長い波長の、なだらかな波形を示しながら流れる空気。まさに「G線上のアリア」にふさわしい。

## 7. あい、そはかの人か

### ——数値予報の現業化——

総観的背景の予測とは、気象要素の空間分布を予測することである。そのためには、各観測点において、気象要素の局地変化（時間変化）を求め、それを現在値に加えてやればよい。簡単な場合、すでに述べたとおり、局地変化は移流効果によって定義される。移流効果は風と気象要素の空間分布（傾度）が与えられると計算で求めることができる。このようにして初期値から出発し、単位時間後の新しい空間分布を計算し、それを初期値として、つぎの単位時間後の新しい空間分布を計算する。このような手順を繰り返すことによって、24時間後でも48時間後でも、気象要素の空間分布を予測することができる訳である。力学の方程式を大気に適用し、その状態を数値的に予測するという数値予報の要点をいかいつまんで述べるとつぎのようになる。

大気の状態やそれに対応する天気分布が変化するのは、地球を取り巻く空気の大規模な流れ方と、それに伴う熱と水蒸気の空間的な再配分のされ方、の結果として現われるものである。したがって、流体力学と熱力学の方程式を用いて、それらの変化を計算で求めることができる。そのためには、力学の方程式を時間変化の項が他の項と同じ大きさの程度になるよう整理し、対象とする

現象の特徴が正しく表現できるものに改め、さらに、数値計算が計算機でうまく処理できるように工夫することが必要である。これを予報モデルの設定という。初期値として用いる観測値も計算機でキチンと処理できるよう整えられねばならない。これを初期状態の整理という。これらの技術が実用面で確立され、計算機の高性能化と相まって、数値予報が現実化され、今では北半球の地上から高層にわたる観測資料が入力されると、それぞれの目的に応じた非常に多くの種類の解析図や予想図が自動的に出力され、FAX で放送もされている。

予報モデルは準地衡風モデルから非地衡風バランス・モデルを経て、プリミティブ方程式モデルに発展した。雑音の扱いについての計算方式が開発され、生じた雑音を抑圧し、増大させないことが可能になったので、リチャードソンの失敗を繰り返すおそれもなくなり、もとの運動方程式を用いるという意味もあって、プリミティブ方程式モデルと呼ばれるアンフィルタード・モデルが、現業モデルとして採用されるようになった。雑音を初めから発生させないモデルよりも、そうした制限のないモデルの方がより自然的と考えられるからである。

元来、風と気圧は独立のものであって、両者に特別の関係はない。しかし、実際の大气の中で観測される事実は両者の高い近似での平衡関係である。これは両者のアンバランスから生ずる雑音を分散的に急速に周囲へ伝播させ、両者の間の平衡関係を回復的に保持する機能によるものと考えられる。これを調節機能と呼ぶ。調節機能が作用する前と後とは同じ平衡関係といっても場の状態は変わっている。調節機能が働くといっても、わざわざ不必要な雑音のためにこの機能を働かせることは無駄でもあり、また、有害な結果を招くおそれもある。そのため、風と気圧の間の平衡関係をキチンと整えることは初期状態として非常に重要なことである。

予報モデルがプリミティブ方程式モデルになったことから、対象は長波だけでなく、中間規模現象も対象として含み得る訳である。しかし、地衡風の平衡と静力学的平衡が圧倒的に高い近似で成立している大気を舞台とする限り、長波の振舞いが顕著に卓越するのは当然である。したがって、プリミティブ方程式モデルが示すものは、長波が卓越する中で、それより規模の小さい現象の存在とその効果がアクセントを持って表現されていると理解するのが自然であろう。

数値予報の現実化によって、天気予報における総観的背景の把握と予測は数値予報が肩代わりしたと言えよ

う。しかし、今まで、総観的背景の把握から局地の天気を予報するまでの過程を、主として天気図作業を通じ、もっぱら図形的感覚に訴えて、処理してきた慣習的手法からすれば、総観的背景の把握と予測を数値予報資料で置き換え、そこから局地化の過程を進めるには、技術的にも作業的にもかなり問題が残されたようだ。

総観的背景の把握と予測を数値予報資料によって解釈するとは、大気の物理的立体構造を力学的に理解し、それに対応する総観的気象構造と天気分布を論理的に特定することである。もともと、非常に理念的な内容を含んだ数値予報の多種多様の資料をうまく処理するにはそれなりの要領がある。つまり、大きくつかんで細かく見よ、である。しかし、従来の意味で高度な専門的知識と豊富な実務的経験を持つとされる予報官でも、数値予報に対するなじみなさがあると、細かくつかんで大きく見損うことがある。とくに、鉛直速度(オメガ)図の解釈にそのきらいが見られる。

数値予報では微分を差分に代え、格子を使って数値計算をするので、不可避的な誤差がある。擾乱の移動速度がおおくなるとか、発達程度が甘くなるとか、急速な変化に対応できないなどの欠点がある。モデルによるクセも無視できない。これらをどう扱うかについては実務的にいろいろと問題があるところであろう。

数値予報の地上予想図の外貌は、見慣れている普通の地上天気図のそれに比べると、非常に大味である。しかし、数値予報が現実化されるまで、外挿以外にとくに有効な手段のないままに、主観的に作成もしくは想定されたソフィスティカルな予想図に比べると、数値予報の地上予想図は、ほかに大気物理的立体構造や総観的気象構造を判断できる資料とともに与えられるので、外貌は大味であっても、一貫性を持った精緻な内容を鮮明に訴える強味を持っている。

しかし、オペラ「椿姫」で、胸を病むマルグリートが余りにも健康的な体つきをしているため、「ああ、そはかの人か」と気にする観客もいるというから、数値予報の大味振りも、高踏的に解釈するばかりでは済まされない面があるかもしれない。数値予報の現実化が進んだ現在では、数値予報資料の利用について、別の観点から、検討すべき余地があるように思われる。

## 8. 神々のたそがれ

—天気予報のXYZ—

数値予報が現実化してから、今では、現場の予報作業も数値予報資料を軸として進められるまでになってい

る。そして、予報期間も96時間というような、従来の手法では及びもつかない先のことまで、力学的に客観的な根拠を持って総観的背景が予測されるようになった。天気予報の立場からすれば、これは非常に重要な意味を持っている。峠の先を見越して山を登るのと、そうでないのとの違いで、明日予報や明後日予報の向上に大きく貢献することは言うまでもない。また、予報期間の延長は、たとえば、水資源が切実なとき、カラカラ天気がさらに1週間続くかどうかの情報を提供し得る点で、社会的には非常に重要である。もちろん、防災的にも大きな役割を果たすことが期待される。社会活動の多様化とか高度化ということが言われるが、そうなればなるほど、週間予報のような延長予報の重要性が増し、週2回ではなく毎日にも必要とされるようになる。そのためには内容の充実と質の向上を図らねばならない。予報期間を延長することは、それだけ遠いところからの影響がきいてくるので計算領域を拡大することが必要である。これに伴う観測網には海陸の分布による制約があるが、気象衛星の登場により貴重な資料が提供されるものと期待される。これからの新しい気象観測システムは必ずしも定時型とは限らない。元来、数値予報の立場から言えば、観測網の疎密の偏在を無くすことが必要である。そのため定時以外に観測される資料を広く活用することが考えられる。これらの資料は観測の時刻、方法、機器が多種多様であるため、数値予報に用いる資料として異質のものを同質のものにする、すなわち同化することが必要である。また、非定時資料をその時刻に入力すると、それまでに確立されている風と気圧の間の平衡関係にアンバランスを生ずるので、その都度、調節機能が働いて、新しい平衡関係が回復的に確立され、そこから新しい予測が行なわれることになる。つまり、解析と予測がサイクル的に連続して行なわれる訳である。このような技術を、4次元資料同化とか4次元解析とか呼んでいる。気象衛星資料の数値予報への利用についてはこのような見地から積極的な活用が考えられ、その技術的開発が進められている。

数値予報では、初期状態をよくすることは予測結果をよくし、よい予測結果はイニシャル・ゲスとして観測資料の取り入れを効果的に高めて初期状態をさらによくし、予測結果をさらによくするというように、循環的によい結果を得ることになる。したがって、予報期間がかなり延長されてもよい結果が期待されるので、延長予報に対する直接的な効果はもちろん、今日・明日・明後日

のような短期の予報に対してもその内容と精度の向上が期待される訳である。

総観的背景の把握と予測については、このように今後いっそうの改善が期待され、前途に明るい希望が持たれている。いっぽう、与えられた総観的な場から局地の天気を予測する手段に対しては、主に3つのアプローチが試みられている。1つは総観的な場と局地の天気の統計的関係を、数値予報が予測した総観的な場と局地の実際の天気との間で直接に確立しようというものである。これによると、数値予報のモデルのクセが統計的関係の中に組み入れられてしまうので、最終結果に対して後からモデルのクセを考慮する必要がない。しかし、モデルに依存するので、もしモデルが改善されると、その都度、統計的関係を洗い直さねばならない。第2は、局地現象に対しあらかじめ与えられた外的条件ごとにシミュレーションによって得られた結果をファイルしておき、数値予報が予測する総観的な場とシミュレーションの外的条件を結びつけることによって、局地の天気を検索的に組み入れようとするものである。応用の仕方によっては非常に効果があるものと期待される。第3は局地の気象について過去の記録から、利用目的に応じて資料を整理してファイルし、数値予報が予測する総観的な場と整理された資料のインデックスを結びつけることにより、または任意的にインデックスを選択することにより、局地の天気を検索的に取り出そうとするものである。

ある時刻の観測結果から出発した予測結果は、つぎの新しい観測結果によって照合され修正されて、そこから新しい予測結果が出発する。このようなサイクルは予報に対するサーボ機能を果たす訳で、総観的背景についてはすでに述べたように、4次元解析がこれに相当すると言えよう。局地の天気についても、そこでの観測資料はもっと頻繁に得られるし、またそのために予報のキメの細かさも必要とされるので、上に述べたようなサーボ機能に相当する解析・予測サイクルを局地規模でシステム化する必要がある。

天気予報はもともと社会性が強いので、純粋な学問的な枠内でのみ扱う訳にはいかない面が多い。予報業務は資料(情報)の収集、処理、生産、蓄積、伝達および利用の全体にわたり、極めて情報科学的である。気象庁100年の歴史に照らして、この情報科学的業務は非常に先進性に富んだ歩みを続けてきたと言える。しかし、近年における情報科学一般の急速な進歩は、気象業務の先進性を追い越した感がある。



天気予報の利用については一般的な立場と専門的な立場とでは事情が異なる面があるが、予報に対して客観性を求める傾向は一般的にもしだいに強くなるものと思われる。予報モデルによる予測結果の差は、大気過程のとらえ方がモデルの特徴の差となって現われることによるものである。したがって、モデルによる予測結果の差は、むしろ意味があるので、最終結果としてこれらを人間の判断によって1つにまとめることは、人間の恣意性によって左右され、あるいは丸められることになり、利用上はかえって有意な情報が失われるのではないかとの考え方がしだいに支配的になっている。

数値予報は同じ初期状態に対して常に同じ予測結果を与え、また、再現もできること、また、予報モデルによる予測結果の差についても客観的な判定を示すことができること、そして、利用目的によってモデルの特徴を評価し選択できることなどが非常に重要な特色である。このことは数値予報に連なる局地の天気予測を含めて、応用的予測の分野についても言えることである。

天気予報を高度に利用する立場として先進性のある航空気象の分野では、もう15年も前から予報の客観化が強く要求され、国際的にもそれについての勧告が出されている。その一つの理由として、予報が当たるとか当たらないかということよりも、こういう方法で予測すれば、こういう結果が出て、その精度はこの程度であるということを明確にすることが、利用する側からは、非常に重要であることがあげられている。もう一つの理由は、予報を提供する側として、いろいろの予報法の相対的価値を評価し、それを系統的に検証することにより、予報の改善を効果的に行なうというものである。そのためには主観的な予報に代わって、客観的な予報を確立し、予報手順を標準化し、情報内容の均質的な安定化を図ることが必要とされている。このことは一般の予報にも通用することで、最近はこの線に沿っての予報業務の改善がいろいろと検討されているのは自然の成り行きと言えよう。

予報の仕事全体が総合的にシステム化され、情報処理が機械化されていくのは時の流れとして受けとめねばなるまい。その中で予報官がどういう役割を果たすべきかは非常に重要な問題である。しかし、予報官がいろいろな資料を抱えこんで、これらを総合判断し、予報をmakeする時代はしだいに終わりに近づきつつあるようだ。いっぽう、予報官は、多種多様な予測結果を含め、いろいろな情報を文字通り適材適所に、深い専門的学識

と経験を持って、interpretする時代になったとも言われている。これはまた極めて高度で困難な仕事であるように思われる。

広い意味で天気予報発展の歴史を振り返ると、人々が自然を相手に生活の知恵として伝承してきた天気俚諺、観天望氣、測器を用いての現地観測結果による局地的な方法などは、それぞれの時代において有用であったことが理解されよう。従来の意味での総観法についても同様である。これらの方法はそれぞれ適用限界があり、それを越えるために次々と新しい方法が導入されるので、その結果、古い方法は相対的に有用性が低下するのは当然である。また、社会の発展との関係において、情報の伝送と利用についての形態が変化し、それに応じて最もふさわしい方法が支配的になるのも自然の成り行きであろう。

今から10年ほど前、世界各国は気象業務が始まってからだいたい100年になるということで、天気予報についてのシンポジウムの開催や記念論文集の発行が企てられた。10年位の単位で眺めると、天気予報の進歩が、技術的にも業務的にも、かなりはっきりと認められる。それに対応して予報官の役割もしだいに変わっている。これからの新しい時代にそなえて、天気予報の将来像をいろいろ考えてみる機会ともなれば、この解説もある程度の役目を果たしたことになる。

時あたかも空は澄み思索の秋を迎えようとしている。「夕立ちの雲も残らず空晴れて、すだれをのぼる宵の月影」(永福門院)を眺めながら、残暑のきびしさを逃れる一刻、この稿を終えた。天気予報についての理解の一助にと心がけながら、余りにも散文的になってしまったことをお詫びする。

#### おわりに

はじめに述べたように、近頃、天気予報に関する書物はかなり多く出されている。いずれも、それぞれ特色があって、それなりの体裁を整えている。その中で、比較的新しく、手頃なものとして、参考までに、つぎの3書をあげておく。ただし、ベスト・スリーという意味ではない。

#### (1) 岡林一夫

天気図の見かた

昭和50年(1975)

保育社(カラー自然ガイド, 27)

#### (2) 倉嶋 厚・青木 孝

防災担当者のための天気図の読み方

- 昭和51年 (1976)  
東京堂出版
- (3) 駒林 誠 (編)  
天気科学  
昭和51年 (1976)  
朝日新聞社 (朝日小事典)
- 基礎的に少し勉強してみようという場合には、やや古  
いが、つぎの2書が標準的である。
- (1) 岸保勘三郎  
数値予報新講  
昭和43年 (1968)  
地人書館 (新気象学叢書)
- (2) 高橋浩一郎  
総観気象学  
昭和44年 (1969)  
岩波書店

## 日本気象学会誌 気象集誌

## 第 II 輯 第55巻 第3号 1977年6月

- 小倉義光・J. Russell・嵯漢如：貿易風帯の逆転層のモデル .....209-221
- 伊藤久徳：熱的強制に対する赤道波の応答 .....222-239
- 山形俊男：2層の系におけるプラネタリー波動の安定性 ( $M$ の小さな極限) .....240-247
- 松尾紉道・瓜生道也・沢田竜吉：回転水槽に生ずる傾圧波動の内部構造に関する実験 II. 力学構造 .....248-259
- 岸保勘三郎：顕熱の南北渦輸送と渦拡散係数 .....260-273
- 安成哲三：気象衛星写真からの平均輝度分布を用いた南半球中緯度帯の定常波の解析 .....274-285
- 斎藤直輔：AMTEX '75 期間における東支那海上の中間規模低気圧の構造について .....286-300
- 近藤純正：不安定成層で且つ地衡風に鉛直シアがある場合の海上風と等圧線のなす  
角度及び海上風速と地衡風速の比 .....301-311
- 横山長之・蒲生 稔・山本 晋：中立安定度の対気境界層中の乱流変動量について .....312-318

## 要 報 と 質 疑

- 近藤純正：海面フラックスのバルク係数 (Kondo, 1975) と気団変質観測やその他の  
フラックス実測値から得たバルク係数の相互比較 .....319-323
- 正 誤 表 .....324