

予報精度と確率表現

立平 良三

1. 天気予報への苦情

天気予報といえば、すぐ「外れ」が話題になる。週末の天気予報が外れたときなど、気象庁の天気相談所には苦情の電話が殺到する。予報が外れて迷惑をかけたことは率直に謝らざるをえないが、もう少し天気予報のむずかしさを認識してほしい気もする。

気象台はよく天文台と間違えられる。実際、天気図にもとづく近代的な天気予報事業を初めて提言したのはフランスの天文台長であった。また、フィリピンでは気象と天文は同じ官庁組織の中で運営されている。

天文のほうでも、潮位の予想とか日月の入出時刻が計算され、広く利用されている。これらの天文関係の予想は一般に非常に正確である。それなのに似たような科学技術の分野である気象のほうは、という批判の目を向けられたので、気象技術者は、はなはだ辛い立場にある。

一般に自然界では、対象が大きいほど正確な予想が可能のようである。太陽や月の運動に関係する予想なら1年先のことでもきわめて正確である。地球上の気象現象でも、直径1000km以上もある低気圧や高気圧の移動なら明日・明後日あたりまでかなり正確に予想できる。しかし、もっと話が細かくなって、長径100kmにも達しない東京

都に明日雨が降るかどうかになると、だいぶ怪しくなる。特に集中豪雨とか雷雨のような烈しい局地的現象になると、数時間前に予報するのが精一杯という具合である。

2. 天気予報の精度

天気予報には、今日・今夜の予報から明日・明後日、向う1週間、1カ月、3カ月の長期にわたるものまである。明日の予報でも時々外れるのに、どうして3カ月も先の予報ができるのかという向きもあろう。確かに長い先のことを予報しようとするほどむずかしくなるのは事実であるが、明日・明後日の予報は1日ごとの予報であり、3カ月予報ともなると月ごとの平均的な気象状態の予報なのである。つまり予報のむずかしさを時間のきざみを大まかにすることで補っているわけである。

天気予報の精度をきちんと検証することは、そう容易なことではない。天気予報というと、すぐ的中率が持ち出されるが、これは誤解を生じやすい尺度である。もし実際の天気は「雨」と「晴」しかなく、天気予報の表現も雨と晴だけなら話は簡単で、ずばりの中率が計算できる。しかし「曇り一時雨、のち晴」式のややこしい天気は頻発するのが実状で、天気予報の表現も同様に単純ではない。

要するに的中率というのは、どういう場合を的中と定義するかによって、数値が大幅に上下する

たてひら りょうぞう 福岡管区気象台長

可能性がある。

米国では、次のような簡明な「的中の定義」によって全国の天気予報の精度を評価している。

まず天気予報の中で最も重視される降水（雨や雪）の有無だけをとりあげる。降水が予報対象期間中に、たとえば「一時雨」とか「のち雨」のように予報されており、実際にもこの期間中のどこかで降れば的中とするのである。

天気予報でいう「明日」とは、明日の日の出から真夜中までの18時間である。だから「午前中雨」と予報して「夕方雨」であってもこの定義では的中となり、ちょっと甘い感じもする。しかし簡明かつ客観的であり、米国の予報精度と比較できるので便利である。

東京の明日予報の的中率は、この定義によると約80%である。米国における明日予報の的中率もほとんど同率で、大体このあたりが天気予報の精度の国際的水準と考えてよい。

明日の天気予報は最もよく利用されている代表的な予報であり、精度向上のために技術開発や設備の充実が進められてきている。しかし、この30年間の実績を見ると、的中率にして5%程度の向上にとどまっている。今後も精度向上のための努力は継続されるが、100%の的中はおろか、90%ですら相当の年月を要するものと思わねばならない。

天気図にもとづく近代的天気予報が始まる前から、雲や動植物などの状態に着目して「観天望気」とよばれる天気予報が行なわれていた。この種の技術でも、70%以上の的中率はあるものと推定され、気象庁の明日の予報との差は10%以下なのである。このため時には古来の観天望気のほうが当たる場合も起こりうる。

天気予報を適切に利用するためには、このような精度の現状をよく認識し、科学的客観的な判断をすることが必要である。

3. 実用的な精度の表現(確率予報)

天気予報は生活あるいは企業活動のための情報であり、天気予報を受信したらそれにもとづいて何らかの意思決定がなされるはずである。この過程は当然ORの対象となりうるものであり、天気予報の利用に関連するORの分野が存在しうる。そのためにはまず、天気予報についての正確な理解が必要であり、特に精度について然りである。

天気予報の精度について利用者の理解を求める努力は、これまで必ずしも充分ではなかった。しかし、最近はその重要性が認識され始め、たとえば台風の進路予報についても予報円方式が導入され、期待される誤差の大きさを表示するようになった。1980年に始まった降水確率予報もこの線に沿ったもので、確率予報はいわば精度を実用的な形で内蔵した予報と考えることができる。

テレビの天気解説などでは、「あす低気圧が通過するので雨が降る」といった形の割り切った説明がなされているが、低気圧と降雨の関係はそんな単純なものではない。日本列島を顕著な低気圧が通過しつつある時でも、日本中が一面に雨になるわけではなく、実際に雨が降る地域は非常に複雑な分布をすることが多い。時には低気圧の中心が通過したのにまったく降らないこともある。

あす低気圧が日本列島にどれくらい接近してくるかは、現在の気象技術でかなり正確に予想できる。しかし、各府県に雨が降るかどうかを当てるにはそれだけでは充分でなく、低気圧にともなう複雑な雨域分布を詳細に予想する必要がある。このような予想はほとんど不可能といってよい。結局、降雨の明日予報というのは雨の降る可能性の大小として表現するのが適当であることが実感できよう。つまり降水確率予報である。

4. 気象庁の降水確率予報

降水確率予報は1980年6月にまず東京地方を対象として始められ、1983年3月からは、全国の各

都府県を対象とし、明日までの降水確率が予報されるようになった。

米国ではすでに15年以上も前から降水確率予報が発表されているが、今でもその意味が正確に理解されていない場合のあることが報告されている。しかし、その内容を分析すると、確率の意味を理解できないのではなく、確率の対象とする「降水の定義」についての誤解の多いことが指摘されている。

確率をとり扱う場合にはまず対象とする事象の定義を明確にしておかねばならない。降水は時間的地域的に複雑に変化し、また強さもさまざまなので、どういう降水を対象にするかによって確率も大幅に違ってくる。気象庁の降水確率予報における「降水の定義」は次のとおりである。米国の場合も基本的には同じである。

(a) 降水の時間帯

当日の9時～15時、15時～21時、明日の9時～21時の3つの時間帯における降水を対象とする。ただしこの時間帯内で連続して降るか、時々または一時的に降るかは区別せず、すべて「降水あり」としてとり扱う。

(b) 降水の地域

個々の地点で降水があるかどうかを対象とする。ただ、都府県内の各地点ごとに違った降水確率値を予報できるほどの技術はないので、原則として各都府県内に対し1つの値を発表している。このため往々にして、「都府県内のどこかで降水のある確率」と誤解される場合がある。

(c) 降水の強さ

予報対象期間中に1ミリ以上降る降水を対象とする。これは気象庁の降水観測網が1ミリ単位で測定していることに対応しているものであるが、また一応雨具を必要とする程度の雨という意味合いでもある。

以上の定義をよく理解していないために、たとえば15時～21時の間の東京都の「降水確率30%」と予報されたとき、15時～21時の間の「30%の時間

に降水があるとか、都内の「30%の面積」で降るといった意味に誤って受取られることがある。

5. 降水確率を予測する技術

明日・明後日あたりまでの天気予報は、次のような過程を経て発表される。

- (1) 世界各地の気象観測データを集めて、現在の大気の状態を解析する。具体的にいうと、地上および上空の天気図を作成する作業である。
 - (2) 現在の天気図をもとにして、明日あるいは明後日の天気図を予想する。この作業は以前は予報担当者が気象学の知識と経験にもとづいて行なっていたが、今は数値予報という技術によってコンピュータで客観的に計算されている。数値予報というのは、大気の運動や気温などを支配する物理方程式に現在の大気の状態を代入し、数値的に解いて将来の状態を計算する手法である。ただし数値予報で予測できるのは、低気圧とか前線のような大きなスケールの大気の状態に限られる。
 - (3) 第3節で説明したように、低気圧のような大スケールの現象を描いた天気図が予測されても、直ちに各地域の雨が予報できるわけではない。数値予報で計算された将来の天気図をもとに、各地の天気がどうなるかを推定しなければならない。この作業を「天気への翻訳」とよんでいる。天気への翻訳は以前は予報担当者の知識と経験によっていたが、現在は、数値予報の予測結果を利用した客観的統計的手法も併用されるようになった。特に降水確率を予報する場合には統計的手法に大きく依存している。
- 降水確率予報が実用化されたのは、技術的に見ると、数値予報を利用した客観的統計的な天気への翻訳技術が確立されたためとってよい。
- 数値予報の予測結果は、具体的には約130km間隔の格子点における風、気温、湿度などの値で示される(地上だけでなく上空の値も)。そこで過去数年間の各格子点における計算結果を説明変数と

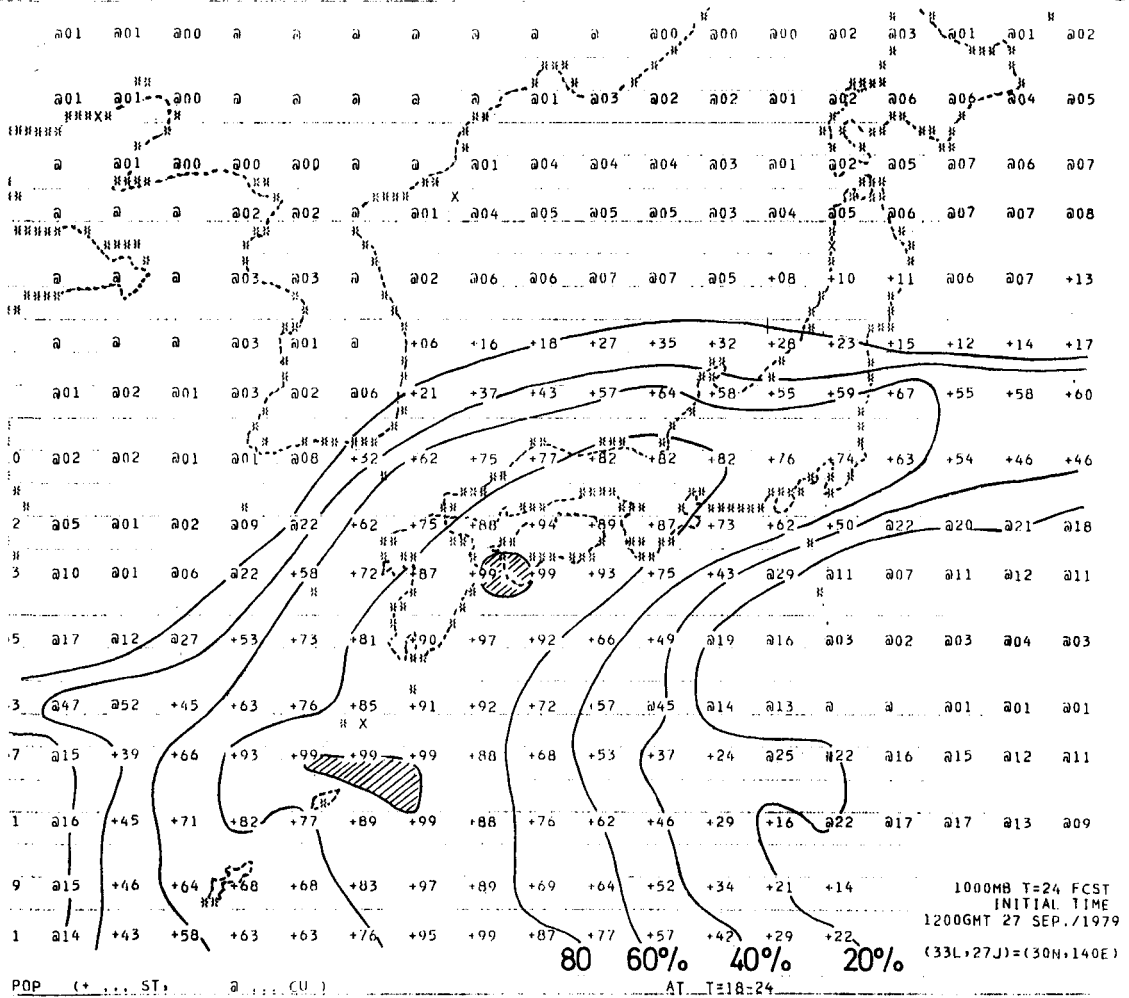


図 1 1979年9月28日15~21時の間の降水確率の予測値(9月27日21時の観測をもとにしてコンピュータで計算したもの)

し、実際にその時に格子点のまわりで起こった降水を目的変数として統計的に回帰式を作っておけば、毎日の数値予報の計算が終わるたびに結果をこの式に代入し、降水の予測値を得ることができる。

目的変数の値を、降水のあったとき「1」、ないとき「0」と数値化して回帰式を作成すると、これが降水確率を予測する式になることが示されている[1]。また、降水量を目的変数の値とすれば、降水量を予測する回帰式が導かれることになる。

以上の手法でコンピュータで客観的に計算された降水確率予報の例を図1に示す。日本列島周辺

には図のように約130km間隔の数値予報の格子点が配置され、この格子点ごとに降水確率の予測値が出力されている。各都府県の予報担当者は、予報担当域の近くの格子点の確率値を参考にし、これに修正を加えて発表している。

6. 確率予報の精度とは？

降水確率予報が始められたとき、これは当たらない天気予報をごまかすためだという批判を聞いたことがある。これはまったくの誤解であるが、確率予報の場合、予報が当たったかどうかの判定がややよくなることは確かである。

たとえば「降水確率60%」というのは、100回このような予報が出たら、そのうち約60回は実際に降水があることを意味している。だから確率予報が当たったかどうかは、かなり長い期間について上の関係が成り立っているかどうかをまず調べる必要がある。しかし、現在の降水確率予報では、このような意味の精度は充分長い期間で調べれば実用的にはほとんど問題なく正確である。この意味での確率予報の精度を *Reliability* (信頼度) とよんでいる。

では日々発表される1回ごとの確率予報については精度は考えられないのだろうか。米国ではこの目的のためブライヤー (Brier) スコアが用いられており、気象庁でもそれを踏襲している。ブライヤースコア (略称 *BS*) は次式で定義される評点で、一種の平方誤差と考えられる。

$$BS = (P - E)^2$$

ただし、*E* は現象 (Event) が生起したとき1、起こらなかったとき0という値をとるものとし、*P* は小数で表現した確率予報値である。

BS の小さい確率予報が精度が高いわけであるが、これはつまり現象の起こった時には1に近い確率が、起こらなかったときには0に近い確率が予報されていることを意味し、常識的な結果である。

BS は本来は地点ごとに計算されるものであるが、日本のように都府県内に対して1つの確率値を予報している場合は、都府県内の各地点について *BS* を計算し、その平均をとっている。東京都の場合は、都内に雨量計が10カ所あるので、この10カ所について *BS* を計算し平均している。都内10カ所で一斉に降っている場合は意外に少なく、たいていは部分的に降っている。部分的な降水の場合、どんな%を予報しても *BS* は0にならないことは明らかである。しかし最小の *BS* になる確率値は存在し、予報官はそのような確率値を目標として予報を発表することになる。たとえば都内の2カ所の雨量計で降った場合は、近似的に都内

の20%の面積で降ったと考えられるが、このような場合に *BS* を最小にする確率予報は同じく20%であることが容易に証明できる[2]。

7. 確率予報の利用価値

降水確率予報を例にとって考えてみよう。降水確率の値が50%以上のとき「降水あり」、50%未満のとき「なし」と予報すれば普通の形式の予報 (カテゴリー予報) になる。

普通の形式の予報の場合、「降水あり」と予報されても実際に確実に降るわけではなく、時々は外れる。しかし、天気予報の利用者は必ずしもどの程度外れるかを明確に知っているわけではない。外れる程度を知らない場合、予報を利用しようとするれば、結局そのまま信用して使うしかないだろう。

「降水あり」と予報して当たる率は、過去の統計によると明日予報の場合で約60%である。また「降水なし」という予報が外れて実際には降ってしまう場合も約10%ある。もしこういう情報を利用者が知っていたら、予報に応じてOR的な対策をとる場合に、より適切な選択ができるはずである。

さらに進んで、1回1回の予報ごとに、その予報がどれくらい的中するかが表示されれば、最適な対策を選択する際により詳細な情報を提供することになる。これがすなわち確率予報である。降水確率70%ということは、「降水あり」という予報的中率が70%ということであり、降水確率20%ということは、「降水なし」という予報的中率が80%であることを意味している。

確率予報を50%を境にして「現象あり」と「現象なし」のカテゴリー予報に変換し、その利用価値がどれくらい変わるかを簡単なモデルについて定量的に計算した例がある[3]。これは実際に発表された降水確率予報とその時の降水状況にもとづいて計算したものである。その結果によると、確率形式にすることによって、カテゴリー予報と

完全的中予報との差の約 1/3 が埋められることになっている。

この結果は簡単なモデルにもとづくものであって、実際の問題に応用するにはまたいろいろと工夫が必要であろう。しかし、確率予報が従来のカテゴリー予報の情報内容を包含するより内容豊富な情報であり、利用の仕方次第でより大きな利用価値を引き出せることは明らかである。今後、このような確率予報への認識が進むにつれて、降水以外の天気現象（風、気温など）や、天気現象以外の予測にも採用されるようになるものと期待し

ている。

参 考 文 献

- [1] Lund, I. L., Estimating the probability of a future event for dichotomously classified predictors. *Bull. Amer. Meteor. Soci.*, 37 (1955), 325-328
- [2] 立平良三：確率予報の精度の評価。測候時報, 48 (1981), 93-97
- [3] 立平良三：確率予報の現状と将来。気象, 25, 6 (1981), 3-5

特 集 に 当 っ て

小 林 竜 一

オペレーションズ・リサーチは未経験または、きわめて経験の乏しい分野の問題に対して最良と思われる対応策を探し出すことを目的とする場合が多い。場合が多いと言うよりは、そのような場合に活躍すべき学問・技術であると言っても言い過ぎではない。なぜなら、多くの経験（記録）がある場合は、統計学による分析や、経験をもとにした小改訂の連続によってより良い解を見出すことが可能な場合が多いからである。

さて、経験に乏しい問題へのアプローチとなれば、頼るのは自分の知恵だけであり、問題の本質をよく吟味して、それを数学モデルとして構築するか、類似の現象を見つけてシミュレーションを行なうかということになる。

この2つの方向でのORの研究でしばしば現われるのが確率の概念であろう。そんなわけで、ORの中で確率の概念はどう使われているかを各方面の方々に書いていただくことにした。

そんなわけで、この特集では確率とは何かを数学的な見地で定義したり、形式論的な議論を展開することは考えなかった。したがって純粋数学の研究者のご意見を伺うことはなかった。

さて、われわれは編集委員会で数回の相談を重ねた。確率が使われると思われる分野はORのほぼ全分野と思われるが、比較的普遍的な話題、すなわち、多くの方が興味を示されると思われる分野の話を収集することにしたらどうか。たとえば、受験の場合の確

率の利用、投票予想の場合の確率の活用法などである。しかし、これらは適当な依頼先が見つからないうちに期限がくるなどのために今回の企画の中に入れることはできなかった。このようにして結局のところ読者のご期待に添えないとしたら、それはわれわれの努力と企画の不充分とお詫びするほかはないが、とにかくお忙しい各界の方々のご好意とご協力が得られて本特集を刊行することができた。この点に関して執筆者および座談会にご出席くださった方々に感謝申し上げたい。

さて、このようにして発行された特集を読まれて、読者の方が確率についてどう結論を出されるか。ご意見は編集部にお寄せいただけるとありがたいと思うが、ここで私も1つの疑問を述べさせていただいて、皆様のご批判をおおきたいと思う。

まえにも述べたとおり、ORとは未経験の分野にふみ込むための科学である。したがって未経験の事柄について確率を使わなくてはならない。それがきわめて幸運にも、先験的確率（机の上で考えられる確率）を想定できるような場合なら確率も上手に使えるだろうが、経験的確率しか考えられない場合にはどうしたら良いだろうか。科学技術が進み、社会システムが進むとき、そのようなケースは増大する一方で、しかもその問題に対する決断の重要性もまた高まってきている。このような環境のもとで、大胆に、しかし賢く確率を使う方法はあるだろうか。