

最近の統計予報の動向*

鈴木 栄 一**

1. はしがき

これまで気象の統計的予報といえ、相関法、周期法、類似法といった物理的裏付けの充分でない経験的な方法が極めて形式的にとりあげられてきた。

事実、長期予報を例にとれば、こうしたアプローチが多様多様に多くの人により行なわれたにもかかわらず、着実な積み上げや体系化がなされないまま将来の発展性が期待されないものとして見切りをつけられてしまった感がある。

そして一面からみれば統計的方法に対する根本的に誤った考え方と、近年飛躍的な進歩をとげ、内容も充実してきた統計学的な各種各様の諸手法の中から有効と考えられるものを導入活用しようと工夫しなかった点についてわれわれ自身反省すべきことがあるのではなかろうか。

アメリカを中心とする諸外国の統計予報の研究が活発なのにくらべ、日本のそれはたしかに立ちおけている事実を卒直に認めざるを得ない。電子計算機利用がこの十年間、飛躍的に浸透している現在、統計予報の現状と今後の方向を見定めることが必要と考えられる。

極端に露骨な表現をすれば、統計的方法とは度数分布をつくり、平均、標準偏差、相関を計算することぐらいにしか考えていなかった点にも原因の一つがあると考えられる。

アメリカにおけるこの数年来の統計予報が電子計算機をフルに活用して発展していることは日本の気象界にとって一つの警鐘と考えられるので、この解説もそのような研究の現状を総括的に紹介することを重点に、日本の

現状についても説明を補足し、問題点を探究してみることとした。

2. 統計予報の基本的性格

前項において指摘した統計的方法に対する根本的に誤った考え方はすべての人にみられるのではなく、一部のみに根づよく残っているものであろうが、それは大別して、次の二つであると筆者は考えている。

i) 物理的関係を示す法則化あるいは記述ができないから、便宜的に統計的方法で処理する。

ii) 利用した統計的方法で効果があがらなかったから統計的方法ではうまくいかないのだと考える。

以上二つの点は各種の調査研究において、現実にかかれた文章のなかから引用したものであるが、前者は明らかに誤り、後者はスリカエである。つまり利用の仕方が悪かったときには利用態度をかえればよいので、統計的方法自身に責任を転嫁するのは明らかにスリカエである。

統計法それ自体は数値予報などに用いられる微分方程式と全く同様に一つの体系づけられた科学的手法であり、道具であるから正しく適用すれば必ずそれなりの効果があるはずで、要は利用態度が問題にされるべきである。物理的うらづけのある統計法で、実際のメカニズムを探究するのが統計予報の基本路線である。

一地点、一地域の気象要素の時間的変化は、その地域を含む、時間スケールからきまってくる周辺領域のいろいろな他の物理的諸因子が関与することによっておこる。この関与の仕方は相関係数だけで検討されるものではなく、種々の統計量によって検討されねばならない。ここから、「一地点、一地域だけの時間的変化を追究する周期法には限度がある。数多くの物理的諸因子を考えねばならないのに、単相関を羅列していわゆるパチンコ方式で事足りるとし、改善の方向を自ら失う態度は反省さ

* Recent Trend of Stochastic Prediction

** E. Suzuki 気象研究所予報研究部

—1968年1月13日受理—

れねばならない。」という結論がでてくる。

つまり周期法は本来現象の実態把握の一手段であって予測の方法にはなり得ないし、相関法は物理的諸因子を定量的に総合する方式に切りかえない限り、予測手法としての発展性は期待されていないのである。こうした二つの面に対する反省と改善が、それぞれ二つの新しい局面を統計予報にもたらしつつある。一つは“Statistical-Dynamical Model of Prediction.”という考え方であり、他の一つは“物理的諸因子の総合による重回帰方式と判別予測方式”という考え方である。もちろんこれらは発展途上にある分野であり、ともに電子計算機の有効な利用によって開発が行なわれつつある。上記二つのうち、後者に精力的研究が数多くみられるのは、十分な検討を加えることによりただちに現場の予報作業に適用可能であるという直接目的をもっているからである。

本来、予測 (Prediction) とはその本質からいって確率的 (stochastic) なものであるという認識は、他の多くの予測を必要とする分野 (経済, 交通, 社会など) では常識となっており、数式的外挿 (extrapolation) を予測という人は少い。予測論の方法論の体系化は昨年夏の PSG (Probability and Statistics Group) サマーセミナーでも検討され、予測とはおこり得る予測対象の条件つき確率分布の推定 (inference) であるという基本的考えが支持され、その上で方法論が展開された。つまり予測対象 (Predictand) Y , この予測の手がかりとなり得る物理的諸因子 (Predictors) を $\mathbf{X}=(X_1, X_2, \dots, Y_p)$ とすると、 \mathbf{X} を与えたとき Y がおこる条件つき確率 $P(Y|\mathbf{X})$ の分布をもとに、条件つき平均をもって予測推定値、条件つき分散 (または標準偏差) をもって予測誤差とする立場が、定量的な Y の予測である。そして決定的な関数関係による予測はこの極めて特別な場合として含まれるべきものとなる。つまり前述の i) は物理的関係をできるだけ実態的に取り入れて統計的ないし確率的関係に内包させることにより、解決されるべきで、物理的な関係が安定したものであるほど、予測誤差を小さく押えられるという基本的態度で誤りが是正される。しかしながらこうした抽象的な記述では説得力に乏しいし、ここで上記セミナーでの方法論をいかに詳しく記述したところで議論倒れになるので、以下実際に示された具体例をもとに研究の方向を探ることにしよう。

3. Statistical-Dynamical Model

これまで、数値予報では主として力学的方程式 (運動方程式など) から出発した各種の方法が開発されてき

た。これに対し、1959年、T. Bergeron が科学的天気予報法を体系づけた報告書をまとめた際、統計的アプローチを示唆したのに端を発し、1965~1968年の間に、T. A. Gleeson, J. A. Russo, R.H. Jones らが力学的予報式の各項と力学で説明できない部分の大きさについて実際に検討するいくつかの試みを発表した。(この他にもいろいろの人がやられたのであろうが筆者はみていない。その結果、Statistical-Dynamical Model (以下SDMと略す) をつくった。大気の状態を示す物理量 q の局所的時間変化 $\partial q/\partial t$ はその外的な支配因子 $F(t)$ と擾乱項 $\varepsilon(t)$ で記述されるとし

$$\frac{\partial q}{\partial t} = F(t) + \varepsilon(t) \quad (3.1)$$

とかく、(運動方程式では $q=u, F(t)=-V \cdot \Delta u + \dots$)

T.A. Gleeson は SDM を導入する目的で簡単な見通しをつけるため、 q については正規分布

$$\psi(q) = (1/\sqrt{2\pi\sigma}) \exp\{-(q-\bar{q})^2/2\sigma^2\} \quad (3.2)$$

を仮定し ($\bar{q} \doteq$ hypothetically true values of q , $\sigma \doteq$ ensemble variance) でともに t の関数、つまり q の時系列は正規分布をする確率過程からの 1 標本である)

σ^2 の時間変化

$$\frac{\partial \sigma^2}{\partial t} = 2q' \left(\frac{\partial q'}{\partial t} \right) \quad (q' = q - \bar{q}) \quad (3.3)$$

$\psi(q)$ が満足する一つの連続方程式

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial t} \frac{\partial \psi}{\partial q} = q' \left(\frac{\partial q'}{\partial t} \right) \frac{\partial^2 \psi}{\partial q^2} \quad (3.4)$$

などを導びき、確率分布 $\psi(q)$ そのものの時間的変化を予測するいろいろの公式を導いた。例として夜間の気温降下を示す式 (Brunt による)

$$\frac{\partial t}{\partial t} = \frac{A}{2\sqrt{t}} \quad (\text{この解は } T = T_0 - A\sqrt{t}) \quad (3.5)$$

や摩擦による風の変化を示す式

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -kv \quad (\text{この解は } V = V_0 \exp(-kt)) \quad (3.6)$$

といった簡単な例で (3.1)~(3.4) から導びかれる結果を検討したしたがって力学的予報式自体についての検討は今後の問題である。これに対し温度保存の仮定 $d\zeta/dt = 0$ を補正した形

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = V \cdot \nabla \zeta + \varepsilon(x, y, z; t) \quad (3.7)$$

も一つの SDM と考えられ、この各項の統計的取扱例

が R.H. Jones. らにより報告されている。要するに

a) 物理的仮定から導かれた予報方程式に残差項を補足し、既知項に比し、補足項が省略できるか否かを実際資料の数値的解析から検討し、モデルをつくる。

b) 物理的な予報方程式自体の各項が時間 t とともにどう変化するかをはじめから非定常であるとし、—(平均)と(偏差)に分解して、それぞれを予測し、あとで総合する。(相関反転という妙な考えはおこらない)といったいずれかの方式で、予測の確率分布(前述した条件つき分布 $P(\mathbf{Y}|\mathbf{X})$ にあたるもの)を導こうとするための検討がはじめられた。この他1965年、R. Younkin らは水蒸気量鉛直積分と断熱垂直運動の仮定から出発して客観的に雲や降水量の予報を行なう。SDMをつくったが必ずしも成功しなかった。1967年、E.N. Lorenz は小さい初期誤差が time step をふむに従ってどう蓄積成長するかという問題(Growth-rate of small error の問題)を論じ、統計的アプローチの重要性をのべた(簡単な simulation example は非線形の時系列、 $X_{t+1}=X_t+X_{t-1}-X_{t-1}^3$ を初期条件 $X_{-1}=X_0=0.5$ でといたものなど)。しかし、力学的予報の統計的表現という段階まで explicit に発展させたものではない。1963年、R. H. Jones は球面上の 500mb 高度予報方程式を球面 確率過程という統計的モデルで近似したが、これはむしろ時系列解析の拡張応用例にすぎず、SDM まで掘りさげられていない。この数年間 E.S. Epstein, A.H. Murphy らにより数値予報の確率的表現方式と Verification の問題が検討されつつあるのは予測の確率化を目指す基本的方向として一応評価されるが、SDM の具体的な定量化まではなされていない。ともかく SDM は最近数年の間に何人かの人により試験的な試みとして着手された分野なので、開発途上の研究課題としてやや暗中模索的段階にあり、キメ手となる決定打は打ち出されていないが、数値予報に密着した統計的なアプローチという点で今後の発展が期待される。統計的手法は本来こうした役割を果たすべきであり、予報モデルの実際的な改善が着実に積み重ねられねばならない。

4. 物理的予報因子の総合による重回帰予報

これまでの周期法、相関法にとって代るべき一つの統計予報がアメリカでは数多く研究され、日本でも石原、鈴木、野本、広瀬らによって研究結果が報告されている。この方向での基本的な考え方は

Y : 予報対象

$\mathbf{X}=(X_1, X_2, \dots, X_p)$: 関与すると考えられる物理的な

予報因子とし、確率的な総合予報方式

$$Y=f(X_1, X_2, \dots, X_p) + \varepsilon(X_1, X_2, \dots, X_p) \quad (4.1)$$

を作成し、誤差項 $\varepsilon(\quad)$ を統計的に最小にする方法である。統計的に最小にする具体的な意味は、

a) この方式作成に用いられる既存データ(Dependent data)での $\varepsilon(\quad)$ の最大値がある限度以上大きくならないようにする。つまり $\text{Max} \varepsilon(\quad)$ を Min . にするミニマックス(Mini-max)法

b) Dependent data による ε^2 の和を最小にする最小二乗法(Least square method)のいずれかを採用する。(4.1)の $f(\quad)$ をきめる場合重要なことは、

i) 各物理的予報因子 X_i の Y に対する関与仕方について既存の物理的知識を最大限に活用する。

ii) なるべく簡単な関数形 $f(\quad)$ を選び、とくに理由の明らかでない限り、複雑なものとしな。一応の原則として $f(\quad) = \sum_{i=1}^p a_i X_i + a_0$ とする。という二

つの点である。たとえば雨の予報のとき V を X_1 , ∇H を X_2 として $X_1 \cdot X_2$ を予報因子とするのではなく、 $V \cdot \nabla H$ を予報因子 X_1 とする。後述のように物理的な雨の予報因子としては $X_1 = \omega$ (垂直流), $X_2 =$ 下層発散(収束), $X_3 =$ 層厚, $X_4 =$ 気温, 露点温度の差, ……といったものをとり、雨量予報の計算に用いられる力学的な項が当然 X_i としてとり入れられる。

この具体例はそのほとんどが電子計算機を利用したもので、かなり多いが、そのいくつかを表-1にまとめておく。この分野で注目すべき研究の一つは R.G. Miller による REEP (Regression Estimation of Event Probability) の提案で、すでにその一部が、“Weather Computer” という名で現業化されているようだ。REEP とはおこり得る予報対象をいくつかに分け、各区分の確率そのものを(4.1)の方式で推定予報することで、霧発生有無を例にとると発生確率 p , 無発生確率 $q=1-p$ をそれぞれ予報する重回帰, R_p, R_q , 既存資料 N 中発生が N_1 回, 無発生 $N_2=N-N_1$ 回とし、それぞれの予報確率 \hat{p}, \hat{q} に対し、予報精度が

$$\frac{\sqrt{(N_1 N_2 / N^3) (1 - R_p^2)}}{\sqrt{(N_1 N_2 / N^3) (1 - R_q^2)}}$$

である。(REEP による予報調整、精度、どちらとも判断できかねる疑問領域設定の方法などは今年の気象学会

第1表 多重回帰予報式計算例

研究者名	予報対象	予報因子群
G.W. Brier (1946)	降水量 (TVA Basin)	気温, 湿度, 風速 成分 etc.
B.M. Lewis J. I. Enger (1946)	気温 (半月平均)	気圧傾向, 風 (地 上, 高層) 層厚 etc.
荒川 秀俊 (1962)	台風移動	気圧場とその変化
T.A. Gleeson (1964)	等圧面高度	大規模な気圧場, 気 温場, 風速 etc.
J. Laure F. Sanders (1965)	雲量, 降水量	下層の水蒸気移流 $\omega \cdot v \cdot \rho H$ etc.
J.A. Russo J.I. Enger G.T. Merriman (1966)	日雨量, (12~48時間さ きの雨量)	等圧面高度, 露点温 度, 気温, 渦度, 発 散, 水蒸気量などの 各積や和
石原 健二 広瀬 元孝 (1966)	積雪深(新潟な ど)	気温, 風速成分, 層 厚, 渦度, 収束発散 など
石原, 野口, 鈴木 (1967)	積雪深(東北, 北陸, 北海道)	〃
W.H. Klein (1968)	降水量 (Tennessee Val ley)	下層の Z, T, 層厚, 渦度, 発散など
J.A. Russo (1967, 1968)	降水量 (6時間~24時 間) 降雨 継続 時間	large scale の循環 を示す物理量, 安定 度, 水蒸気移流など
N. Yacowar (1968)	気温 最低気温	下層の気温 anomaly, 層厚, 風のシャ ーなど
I.A. Lund (1968)	南ベトナムの 雨期開始日	下層気圧(分布), 湿 度, 風など
野本 真一 (1968)	視程	気温, 風速, 気温と 露点温度の差, 気圧 など
石原, 鈴木ら (1968)	降水量 (台風, 雷雨, 梅雨) 雷雨発生数	上層の Z, 気温, 風 速成分湿度, 渦度, 発散, ω , 地上の風 速成分など

で筆者により報告されている) こうした予報方式が霧, 雲, 雨, 気温, といった要素別, 地区別, 季節別, 原因別の各種の分類で, Computer の中に体系づけて用意され, 予報利用者が電話一本かければ, 丁度新幹線の切符をうる「みどりの窓口」のような要領で, ボタンをおし, 初期条件 \mathbf{I} を入れるだけで即座に答が出てくる仕組が検討されている. 1964年, C. D. L. Matin (Air Weather

Service) の要請により TRC (Travelers Research Center) の統計部門 (Mathematical Statistics Division) がつくったもので, 区別の確率ベクトル \mathbf{P} は予報方式マトリックス \mathbf{R} に \mathbf{I} をかけ $\mathbf{P} = \mathbf{I} \cdot \mathbf{R}$ として output されるよう, Users Manual for Statistical Computer Program Package (TRC Program Tape Reference Manual の1部) が, T. G. Jhonson ら4人の協同研究でつくられ, R.G. Miller, K.A. Abrahamson らにより実験テストも行なわれた.

表-1にあげた具体例では ミニマックス法は全然用いられていないが, 災害防止を目的とするとき, この方法も考慮されるべきであろう. (4. 1)の $f(\quad)$ としてはほとんど全部一次式 $a_0 + \sum_{i=1}^p a_i x_i$ が採用されている

が, i の点から $\log(A+BX)^n$, $(A+CX)^{-n}$, e^{-DX} といった非線型のものが入っても一向かまわない, 要は, こうする物理的な理由があり, こうして精度が明らかになる実際の効果があがればよいのである. また f として数値予報などで用いられている偏微分の形式で書かれた項およびその積などをそのままあげてもよく, そのときは SDM の一種と考えられよう. こうした面で, 今後検討すべき問題があるが, 物理的に Y に関与すると考えられていた因子 X_i の中には実際に検討すると必ずしもそうでないものがあるため, 有効な因子を撰定する目的で, 3種類の要因撰別法 (Screening method) が開発された. しかしこれは今のところ Y との相関係数から判断するという単純な形式処理なので, 予報方式作成に用いられていない新たな資料によるチェック (Independent check といわれる) で安定した有効因子をえらぶ方法を開発しないと, 重回帰予報の発展性が期待されない. また予報値 \tilde{Y} と予報誤差 $\sigma_Y(1-R^2)^{1/2}$ とを同時に計算して発表しないと, この方式による予報の信頼性が明らかにならない点をとくに注意したい. (σ_Y は X の既存資料での標準偏差, R は Y と X の重相関係数)

5. 物理的予報因子の総合による判別予報

1962年, R. G. Miller が ceiling height を5階級に分けてそのいずれがおこるかを判別する予報方式を提案し, それによって学位を得た. このことは統計予報の一つの新しい局面を開いたものとして注目してよい. 判別解析 (Discriminant Analysis) という考え方は戦前にもあったが, 戦後各方面で使われるようになった. 気候分類にも筆者により用いられたことがある. 予測に本格的に使ったのは Miller が最初である. これとほとんど

同時に、筆者も研究を進めた。ここではなるべく数式を用いないで、その意味、目的と取扱い上の注意をのべ、具体例をあげることにする。

a. 2群(2カテゴリー)判別予報.

雨が降るか否か、霧が発生するか否かなどを物理的諸因子を総合して判断する予報方式は客観予報(Objective Forecasting)の名のもとに、H.A. Panofsky, J.C. Thompson, L. Berkofsky, など多くの人により試みられたが、それらは要するに、共軸図法(Co-axial method)と同じく、因子の組合せ散布図をもとに適当な等値線を入れた方法で等値線のひき方、結果の総合仕方に、人の主観による任意性が残り、客観予報の名に値しないものであった。そうした主観を除き、誰がやっても同じ資料からは同じ結果しかでない客観的なものとして判別解析による予報方式がとりあげられた。二つのカテゴリーA, Bのいずれかがおこり、これ以外に考えられない予報対象(Mutually exclusive and exhaustive Predictand)Zに対し、物理的に関係していると考えられるいくつかの予報因子を $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_p)$ とする。このPコの予報因子のN組の値 $(X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{pi})$ ($i=1, 2, \dots, N$)はP次元因子空間(これをMillerはPredictor Spaceと名付けた)のNコの点と考えられる。この空間に仕切りとなる一つの面(平面でもよい)をおいて2つの部分に区切り。その一方ではAが充分高い確率 P_A (たとえば、0.9以上)でおこり、他方ではBが充分高い確率 P_B でおこるようにする。この仕切り平面を $P_A + P_B$ が最大になるように処理してつくった場合これを

1次判別平面といい、式で書いて $I = \sum_{i=1}^p b_i X_i$ としたも

のを線型判別関数(linear discriminant function)とよぶ。 $P_A = P_B = 1$ にする極めて複雑な曲面(複雑な区分線の立体化したもの)をつかって意味がないので、通常平面が用いられる。因子のとり方を工夫すれば(たとえば $e^k X$ 自体を X とおくことで)原則的に平面で事足りるが、実際にはこの平面近傍にどちらとも判別しかねる疑問領域(Doubtful region)があり、それを理論的にきめる方法がC.R. Raoらにより研究された。この仕切り平面をつくるのにMillerは行列積の固有ベクトルを電子計算機で計算するという面倒な方法を提示し、RaoはP次元Mahalanobis距離というものに着眼した理論を開発したが、このIをつくるかぎり、前項でのべた重回帰式の特別な場合とを計算すればよいので簡単である。特別な場合は総データN組中、 N_A 回Aがおこり、 $N_B = N -$

N_A 回Bがおこった既存データによって、Aの場合は $Z = N_B/N$ 、Bの場合は $Z = -N_A/N$ とにおいて(分子と符号に注意!)Zと (X_1, X_2, \dots, X_p) との重回帰式をつくるとそれがIと全く同じものになる。(Zの平均=0だから定数項がおちる)この証明は簡単であるが、新編統計数値表(河出書房)1952 170頁にある式の扱い(上から10行目)は誤りである。よって計算は前項の重回帰式計算プログラムがそのまま用いられる(Y→Zにおきかえるだけでよい)。

b. 多群(2カテゴリー以上)の判別予報

これについても基本的な考え方はa.と同じ、ただ $G (\geq 2)$ コのカテゴリーに区分するのに $G-1$ コの判別平面が必要になる点で $G=2, 3, 4, \dots$ として逐次考えると明らかに理解できる)計算方法が一寸面倒である。J. G. Bryanはカテゴリー確率の代りにこれと本質的に同等な尤度(likelihood)というものを解析的に導びいてLEQモデルなるものを提案した。多群のとき、それを A_1, A_2, \dots, A_G とおくなら、既存データで確率 $P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_G)$ を最大にするように工夫して作った $G-1$ コの判別平面で、判別予報ができる。このとき、実際1組のデータ $\mathbf{X}_0 = (X_{10}, X_{20}, \dots, X_{p0})$ が新たに得られたとき、これが A_1 に入る確率推定値 $\tilde{P}(A_1 | \mathbf{X}_0)$, \dots , A_G に入る確率推定値 $\tilde{P}(A_G | \mathbf{X}_0)$ がもとめられ、このうちの最大確率推定値 $\text{Max}_{1 \leq g \leq G} \tilde{P}(A_g | \mathbf{X}_0)$ なる群がもっともおこりやすいと判別予報するのが、この基本的考え方である。J.G. Bryanは $\tilde{P}(A_g | \mathbf{X}_0)$ の代りにP変量正規分布の尤度である。

$$L_g = \text{Const} \cdot (g) \cdot \exp(-\mathbf{X}_0 \text{に関する2次形式}) g \quad (5.1)$$

$$\text{をとりあげ } L_g / (L_1 + L_2 + \dots + L_G) \quad g=1, 2, \dots, G$$

$$(5.2)$$

なる比をLEQ(Linear Exponential Quotients)と名づけこの最大となる群を予報とすればよいとのべた。

これらに関する面倒な数学的な定式化がなされているが、a. b. いずれにしても、既存データにより予報適中率の和を最大にする判別方式で実用上いかに否かに問題がある。たとえば暴風や大雨のおこりそうなとき、

A_1 : 何ら注意をしないでよい状態

A_2 : 注意報を出すべき状態

A_3 : 警報を出すべき危険な状態

とすると、 A_3 の子報外れを極力なくし、 A_1 の子報外れは大目に見るという立場で適当な予報適中率荷重和

$\sum_{g=1}^3 W_g P(A_g)$ を最大にするよう上述の判別平面を修

第2表 判別予報式計算例

研究者名	予報対象	予報因子群
R.G. Miller (1962)	下層雲高 (底) (ceiling height)	気圧 tendency, 露 点温度, 視程, 風の 変化, 雲底高度(前)
鈴木 栄一 (1964)	地域最大日雨 量(北陸)	安定示数, 水蒸気移 流, 発散, 飽差, 可 降水量など
T.A. Gleeson (1964)	等圧面高度	大規則な気圧の場, 気温, 風
J.A. Russo J.I. Enger G.T. Merriman (1966)	降 水	等圧面高度, 露点温 度分布型, 渦度, ω , 発散 etc.
R.G. Miller ら (1966~)	霧, 視程, 天気 ...	気温傾度, 湿度, 安 定示数, など
石原, 野口, 鈴木 (1967)	降水, (降雪) (天竜川流域, 北陸)	等圧面高度, 気温, 風速成分, 湿度, ω , 渦度, 発散
A.H. Murphy (1968)	降水, 霧, 雲量	下層安定度, 気圧分 布, 気温, 視程の変 化量など
鈴木 栄一 (1968)	なだれ	斜面 傾斜などの地 形条件, 樹高, 樹密 度などの植生条件
J.G. Bryan (1968)	雲底高度 ceiling height	R.G. Miller と同 じ

正して, つくりかえる必要が生じ, これが筆者により, 最小危険判別 (Minimum Risk discrimination) という名で定式化された. 最近数年間に実際に報告された判別予報式の例を表-2にまとめておく. (この他の例もあるが, 筆者に理解しがたい結果なので省略した).

判別予報方式は誰でも同じ資料から全く同じ結果を得るという意味で, 客観的なものであり, 2. でのべた統計予報の基本的性格に合った考え方であるが, なおいくつかの問題があり, 以下それにふれておこう.

1) 判別平面近傍のどちらとも判別できにくい疑問領域にある場合どうするか.

2) 前述のような A_1, A_2, A_3 の判別で A_2 の可能性が A_3 の可能性より僅かに大きいときでも注意報にとどめるべきか, 警報を出すべきか, つまり確率 $\text{Max } P(Ag|\mathbf{X})$ だけで形式的に処理してよいか,

3) 予報対象の確率的可能性だけで現実の対策がたてられるだろうか.

4) 降水量のように量的なものをいくつかの階級に分

けて (0~30mm, 31~60mm, 61~100mm, ...としたときなど) 判別予報したとき, 重回帰予報との関連はどうか, 階級分けの仕方によつて判別予報結果が異なる問題をどう処理すべきか.

5) 判別予報の予報因子の中に定性的なもの (下層ジェットの有無, 前線の有無など) はとり入れ得ないのか, といった諸点は実際の子報官から提起された問題であり, たしかに今後一層検討すべきである. 判別予報の研究も開発途上のもので, こうした面も合わせ, 物理的予報因子のとり入れ方についてさらに研究を進展させねばならない.

6. 統計予報における最近の話題

現場の子報関係者からよく質問される事項について以下, なるべく簡単にその意味を説明し, あわせて最近の新しい考え方の解説をしておく.

i) 経験的直交関数 (Empirical Orthogonal Function).

気圧や気温など気象要素の空間分布を座標 (x, y) の関数として $F(x, y)$ とかく. y を固定し, x のみの関数として1次元のフーリエ展開 (調和分解) をし, 有限項数 m で打ち切るとき, m を大きくするにつれ, 実際との差 (以下残差 residual とよぶ) は小さくなる. 2次元なら2重フーリエ展開が考えられたり, 球面調和波とか球函数展開が考えられたりする. そして関数形のえらび方により一定項数 m で打切ったときの残差がちがう. なるべく項数を少なくし, 残差も極力少なくするという原理的に相反する二つの面を統計的に調整する目的で1957年 E.N. Lorenz が提案したのがこの方法であり, 成分分析 (Component Analysis) ともいう. 簡単のため観測点が $N=10$ あり, 2つの直交関数 $S_1 S_2$ をとるとすると, 観測点の値 $F_i(x, y)$ について10つの式

$$F_i(x, y) = a_{1i}S_1 + a_{2i}S_2 + \epsilon_i \quad i=1, 2, \dots, 10 \quad (6.1)$$

が得られる. 直交関数をえらぶ理由は (6.1) でさらに S_3 を加えて残差を一層小さくしようとするとき, すでにもとめられた a_{1i}, a_{2i} をかえなくてもよい利点があるからで, このとき,

$$\sum_{i=1}^{10} \epsilon_i = 0, \quad \sum_{i=1}^{10} \epsilon_i^2 \rightarrow \text{Min}$$

ならしめるには $E(S_1 S_2) = 0$ という直交性を満足するよう統計的に a_{1i}, a_{2i} と S_1, S_2 の形をきめればよい. この考え方は1938年ごろから P.G. Hoel, H. Hotelling らにより提出されたもので, 特に Lorenz が独創的に

工夫したものではない。結論的には各観測点間の F_i , F_j の相関係数 r_{ij} を (i, j) 元素とする10行10列の対称行列について固有値, 固有ベクトルをもとめればよく, 最大固有値 λ_1 / (地点数 10) は第1成分 S_1 で実際の空間分布から得られる情報の何%が記述されているかを示し, S_1 は λ_1 に対する固有ベクトル $(l_1, l_2, \dots, l_{10})$ を用い

$$S_1 = l_1 F_1 + l_2 F_2 + \dots + l_{10} F_{10} \quad (6. 2)$$

とかかれる。2番目に大きい固有値 λ_2 , とそれに対する固有ベクトル $(h_1, h_2, \dots, h_{10})$ から, 同様の結果を得る。 $(\lambda_2/10)$ は第2成分 S_2 で何%記述されるかを示し第

$$2 \text{ 成分は, } S_2 = \sum_{i=1}^{10} h_i F_i \text{ とかかれる)$$

結局 $(\lambda_1 + \lambda_2)/10$ が二つの成分 S_1, S_2 で F の空間分布から得られる情報の何%が表現されているかを示し, 残差の部分は $100(1 - (\lambda_1 + \lambda_2)/10)$ % である, 平たくいえば複雑な空間分布の大勢は第1成分でとらえられ, これに独立な中間的趨勢が第2成分でとらえられ, その上に不規則的な擾乱項が重なっているというわけで, こうした解析は1963年鈴木, 1967年 J.E. Kutzbach, 1965~1968年広瀬 (未印刷), 1968年 F.B. Miller と J.Clodman らにより行なわれ, 各成分ごとの予報を重回帰式で行なうことが, E.N. Lorenz, 広瀬により試みられた。とくに長期予報ではこの経験的直交展開における各成分の予報が, 一つの統計的な基本場の予報 という意味で重要である。

ii) logit model と (指数平滑)。

前者は1種の成長曲線 (logistic curve) のことで, 力学的予報と実際とのちがいである誤差が時間とともにはじめは少しずつ増加し, 途中から急速にふえ, あるところへおちつくというモデルで (実際は必ずしもそうならない)。人間や動物の成長する過程 (Verhulst らの定式化がある) と似た現象があらわれる場合がある。後者は時系列を $x(t) = \sum_{\tau} \alpha_1^{\tau} x(t-\tau)$ で予測するとき, α_1^{τ} が τ について次第に減衰する ($|\alpha_1| < 1$) ことを示し, 指数関数的減衰をするウェイトをかけた時系列の移動平均であって1961年 D.R. Cox の提示にはじまり1966年 R. H. Jones がこうした経済時系列解析においてよく用いられた手法を気象の問題に応用したことから2, 3人により研究がすすめられ, Idea として興味あるだけで, 統計予報の立場から実用価値は疑問である。

iii) 数量化分析 (要因分析) による統計的予報

林知己夫らにより開発された手法で, 定性的変量 (前線の有無など) が予報因子の中にある場合, y と x との

相関比, 重相関比などを最大にするよう定性的変量の各カテゴリーに数値をあてがって予報方式を定式化する。なだれの判別予測を地形, 植生条件をもとに行なうとき利用された。問題点と気象の統計的予報への応用例が近く筆者により発表される。1968年柴田裕司は気候値 (年降水量など) の地形因子による推定にこの方法を応用した。気象の統計的予報にも今後役立つ可能性があるが, 将来の問題である。

iv) 正準相関分析 (Canonical correlation analysis) による予報

物理的予報因子の1次式と予報対象ベクトルの元素についての1次式との相関係数を最大にする手法で, パターン (気圧や気温の等値線状態) が予測できるということが1954年 F. H. Malone らにより報告され, この方法とすでのべた重回帰予報式, 判別予報式との関係が1968年 H.R. Grahn により研究され, 統計予報の1手段であるとされたが, 筆者は予報対象の1次式自身の予報がどのような意味をもつか疑問であると考えている。

(H.R. Grahn の結果は未印刷)

7. あとがき

以上, 最近の統計予報の動向を探ってみた結果をみて気づかれるように昔ながらの週期法, 相関法というものは全く影をひそめてしまったのである。力学的予報の基本的関係である。

$$\partial q / \partial t = F(x, y, z, \partial / \partial x, \dots) \quad (7. 1)$$

といった決定的関係式は (7. 1) が成立つ確率を p とするとき統計的には $p = 1$ という特殊な場合として把握される。つまり $A = B$ である という代りに $A = B$ である確率が1に充分近い (どのくらい近いかは別にして) という具体的実例による結果におきかえることができる。統計予報はこうした面から出発して検討されるべきであろう。

ここに紹介したものが, 必ずしもすべて物理的知識をフルにとり入れた統計予報であるとは考えられない。しかしここでのべた研究が着実に積み上げられていくことが, 統計予報の発展のため必要であり, 今後こうした方向での発展が期待されなければならない。

紙面の関係で, 意味だけしかのべていないが, 別の機会に総括的にまとめるとして, ここには少くも筆者が読んだり, 聞いたりしたものを多少整理してまとめたつもりである。

文 献

- 1) A general method of probability predictions in

- synoptic meteorology, US Navy Weath. Res. Fac. 1966, March.
- 2) 荒川秀俊, 1961: 統計的数値予報法による伊勢湾台風の進路および中心気圧の予報. 研究時報 13, 4, 304—305.
 - 3) Arakawa H, 1962: Regression equations to forecast the movements and surface pressures of typhoons in the Western-North Pacific. Report sponsored by WMO. 201—206.
 - 4) 荒川, 石原, 野口, 広瀬, 鈴木, 1965: 降雪強度の予報に関する研究. 防災科学技術総合研究報告 2, 41—58.
 - 5) Bergeron, T. 1956: Methods in scientific weather analysis and forecasting. New York Oxford Press 509 pp
 - 6) Brier. G.W., 1946: A study of quantitative precipitation forecasting in the TVA Basin. Res. Paper 26 WBDC 40 pp.
 - 7) Bryan, J.G. 1968: Development of a computational technique for multi-group probability forecasting using a linear exponential-quotient (LEQ) Model. Proc. Stat. Met. Conf. 61—75.
 - 8) Cox. D.R., 1961: Prediction by exponentially weighted moving averages and related methods, J.R. Stat. Soc., B 23, 413—422.
 - 9) Curtiss, J.H. 1968: An elementary mathematical model for the interpretation of precipitation probability forecasts. J. Appl. Met. 1, 3—17.
 - 10) Epstein E.S., 1968: On the correspondence between theory and practice in probability forecast. Proc. Stat. Met. Conf. 142—147.
 - 11) Glahn, H.R., 1967: Canonical correlation and its relationship to discriminant analysis and multiple regression. J. Atm. Sci. 25, 23—31.
 - 12) Gleeson, T.A., 1964: Probabilities of pressure height forecast by graphical and numerical methods J. Appl. Met. 3, 529—540.
 - 13) Gleeson, T.A., 1968: A modern physical basis for meteorological prediction. Proc. Stat. Met. Conf. 1—10.
 - 14) 林知巳夫, 1959: 数量化と予測に関する根本概念, 統計数理研究所彙報, 7, 1, 43—64.
 - 15) 林知巳夫, 1961: 数量化理論とその応用例, 統計数理研究所彙報, 9, 1, 29—36.
 - 16) Jones, R.H., 1963: Stochastic processes on a sphere as applied to meteorological 500-millibar forecasts. Proc. Symp. on Time Series Analysis. New York Wiley, 119—124.
 - 17) Jones, R.H., 1964: Prediction of multi-variate time series. J. Appl. Met., 3, 285—289.
 - 18) Jones, R.H. 1965: An experiment in non linear prediction. J. Met. 5, 701—705.
 - 19) Klein, W.H., 1968: An objective method of predicting quantitative precipitation in the Tennessee and Cumberland valley. Proc. Stat. Met. Conf. 20—28.
 - 20) Kutzbach, J.E., 1967: Empirical eigenvectors of sea level pressure, surface temperature and precipitation complexes over North America Journ. Appl. Met. 6, 5, 791—802.
 - 21) Lewis, B.M. and I. Enger, 1959: Objective prediction of five day mean temperature during winter. J. Met. 16, 676—682.
 - 22) Lorenz, E.N. 1956: Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction. MIT Dept. of Met. Scientific Report No. 1, 49 PP (AF 19(604)—1566).
 - 23) Lorenz, E.N., 1965: A study of predictability of a 28 variable atmospheric model. Tellus 17, 321—333.
 - 24) Lorenz, E.N., 1968: On the range of atmospheric predictability. Proc. Stat. Met. Conf. 11—20.
 - 25) Lund, I.A., 1968: An experiment in developing a linear prediction equation for estimating the date of establishment of the rainy season in southern South Vietnam. Proc. Stat. Met. Conf. 110—115.
 - 26) Miller, R.G. 1962: Statistical prediction by discriminant analysis. Meteorological Monograph. 4, No. 25, Boston Mass. Amer. Met. Soc. 53 pp.
 - 27) Miller, R.G., 1964: Regression estimation of event probability. TRC. Report. 1, (USWB Contract-10704)
 - 28) Miller, R.G., 1968: A stochastic model for real-time on demand weather prediction. Proc. Stat. Met. Conf 48—51.
 - 29) Mount, W.D. and I.A. Lund., 1963: A simplified procedure for selecting predictors and deriving prediction equations J. Geophys. Res. 68, 3619—3625.
 - 30) Murphy, A.H., 1928: The evaluation of probabilistic prediction in meteorology. Contract Cwb-10847, NSF Grant GA-906.
 - 31) 野本真一, 1968: 視程の短時間(トレント)予報. 飛行場予報資料 7. (プリント)
 - 32) Roper, W.D., 1962: Evaluation of statistical and computer typhoon forecasting procedures. Annual Typhoon Rep./ Joint Typhoon Warning Center, Guam 241—267.
 - 33) Russo, J.A., 1967: J. I. Enger and G.T. Merriman: 1966: A statistical approach to the 12—48 hr prediction of precipitation probability. Travelers Research Center 107 pp.

- 34) Russo, J.A., 1967 : Further experimentations -statistical prediction of precipitation probability-. JRC. Report 7624—268.
- 35) Russo, J.A., 1968 : Physical-statistical prediction of precipitation probability for the summer season. Proc. Stat. Met. Conf. 29—38.
- 36) 柴田裕司, 1968 : 地形因子を用いて要因分析による平年降水量の推定, 気象学会月例会 (2月) プリント
- 37) 鈴木栄一, 1962 : 統計的予報要因選別法. 測候時報, 29, 11, 363—369.
- 38) 鈴木栄一, 1964 : カテゴリー予報, 気研ノート 12, 1, 331-340.
- 39) 鈴木栄一, 1964 : 降水量に関する統計的研究 (16), 北陸地方における大雨の判別解析. 研究時報, 16, 4, 195—212.
- 40) Suzuki, E., 1964 : Categorical prediction schemes of rainfall types by discriminant analysis. Papers in Met. and Geophys. 15, 2, 119—160,
- 41) Yacowar, N., 1968 : Objective temperature forecasting. Proc. Stat. Met. Conf 89—95.
- 42) Younkin, R., Larue, J. and F. Sanders, 1965 : The objective prediction of clouds and precipitation using vertically integrated moisture and adiabatic vertical motion. J. Appl. Met. 4, 1.

CALENDAR OF EVENTS

World Meteorological Organization

- 15—21 August 1968 Working Group on Radiation Instruments and Methods of Observation for General Use (CIMO), Bergen Norway
- 15—21 August 1968 Working Group on Special Radiation Instruments and Methods of Observation (CIMO), Bergen, Norway
- 19—21 August 1968 Working Group on Radiation (RAVI), Bergen, Norway
- 19—31 August 1968 Commission for Maritime Meteorology (CMM), 5th session, Kingston, Rhode Island, U.S.A.
- 22—28 August 1968 Symposium on Radiation including Satellite Techniques (IUGG/WMO), Bergen, Norway
- 26—29 August 1968 Working Group on Instruction in Climatology (CCI), Geneva, Switzerland
- 26—30 August 1968 International Conference on Cloud Physics (IUGG/WMO), Toronto, Canada
- 2—7 September 1968 International Symposium on Atmospheric Ozone (IUGG/WMO), Marseilles, France
- 9—19 September 1968 Executive Committee Panel on the Structure and Functioning of WMO, Geneva, Switzerland
- 9—21 September 1968 Commission for Hydrometeorology (CHy) 3rd session, Geneva, Switzerland
- 16—20 September 1968 Panel of Experts on Telecommunications (IOC/WMO), Geneva, Switzerland

Other International Organizations

- 6—15 May 1968 Co-ordinating Council for the IHD (UNESCO), 4th session, Paris, France
- 9—21 May 1968 Committee for Space Research (ICSU), 11th plenary meeting, Tokyo, Japan
- 3—15 June 1968 Scientific Committee on Antarctic Research (ICSU), 11th meeting, Tokyo, Japan
- 17—21 June 1968 Scientific Committee on Oceanic Research (ICSU), 9th general meeting, California, U.S.A.
- 14—27 August 1968 United Nations Conference on the Exploration and Peaceful Uses of Outer Space, Vienna, Austria
- 20—24 August 1968 World Power Conference, 7th Plenary Meeting, Moscow, U.S.S.R.
- 4—13 September 1968 Intergovernmental Conference of Experts on the Scientific Basis for Rational Use and Conservation of the Resources of the Biosphere (UNESCO), Paris, France