

## 天気予報における確率・統計的方法の WMO シンポジウム\*

鈴木 栄 一\*\*

### はしがき

上記のシンポジウムが1980年9月8～12日南フランスのニース (Nice) で開催され、日本から広瀬元孝 (気象研究所予報第2研究室長) と筆者が参加した。この状況を報告する前に、開催までの経緯をのべよう。

一昨年11～12月の統計気候学国際会議 (この状況は、「天気」Vol. 27, No. 7 に詳しく報告されている) の席上で A.H. Murphy (オレゴン州立大) から「WMO を中心にフランス気象学会と、アメリカ気象学会が協力して、世界的規模での確率・統計的方法による天気予報のシンポジウム開催計画をすすめていること、主要8テーマについて招待論文 (主に Leading researchers によるもの) と一般論文を受理する態勢ができて、受理条件や受理先もきまってきたから、論文申込とアブストラクト (300～500語) 送付を1980年2月までに願いたい」との発言があり、同時に WMO からも気象庁企画課などへ一連の WMO 行事と合わせて連絡があった。

日本でも1980年6月から東京で雨の確率予報がすでに実験的に部外発表されており、気象庁予報課はその準備に追われ、その研究開発成果を論文にする余裕が十分でなかったこと、この分野の研究者、技術者の層もアメリカにくらべ、そう厚くない現状であること、その他日程的に間に合わない方々もおられたため、結果的に日本からは上記2名の参加となった。

確率・統計予報の研究とその技術化、業務化の面でスタッフも十分多く、かつ実績をもつアメリカからの参加

者をもっとも多く、これに追いつこうと意気込んでいるフランスを中心にヨーロッパからもかなりの参加者があり、総人数はオブザーバを入れ100名内外という盛況であった。アジアからは中国人3人をはじめ少人数ながら参加者があり、このテーマによるはじめてのシンポジウムとしては成功裡に終了したものと思う。(WMO の中で、先進的役割を果たしてきた気象庁としては今後もっと意欲的にこの分野で活躍されることが望ましい。)

国際的な学会や会合 (シンポジウム) のプログラム委員会から当然のこととして提示される条件だが、(i) 一定水準 (standard of relevance or quality) に達しない論文、(ii) 適切に間に合わない期限おくれの論文は受理できないといわれると日本人とはかく尻込みし勝ちになるのだが、実情は (i) をそれほど気にせず、積極的に参加活躍されることに意義があるだろう。

もちろん innovative trial が望ましいが、確率予報や気象統計のレベルは、そこで用いられる統計手法自身を現代統計学理論からみれば決して高いものとは考えられないのである。

たとえば、かつてオペレーションズ・リサーチ学界で流行して周知のはずの Fuzzy set 的理論とその統計予報への応用 (中国人参加者が発表した) となると、実は Methodology 的質疑応答は全くないし、あとで何人かの人が中国人や筆者に「ファジーって何ですか?」と聞きにくるのが実情である。

### 1. シンポジウムにおける主要テーマの変遷

当初 A.H. Murphy を Chairman, L. Bentsson を Co-chairman とする WMO プログラム委員会 では 8

\* WMO Symposium on Probabilistic and Statistical Methods in Weather Forecasting.

\*\* Eiichi Suzuki, 青山学院大学経済学部.

コの relevant topics

- (1) large-scale probabilistic and statistical weather forecasting.
- (2) advanced techniques in probabilistic and statistical forecasting.
- (3) stochastic-dynamic prediction.
- (4) use of probabilistic and statistical methods to study error growth in dynamical models.
- (5) probabilistic and statistical methods of long-range weather forecasting.
- (6) statistical modification of large-scale dynamical forecasts.
- (7) probabilistic and statistical forecasting of extreme or rare events.
- (8) probabilistics and statistical methods in model verification and forecast evaluation (especially large-scale models and forecasts).

をきめて、申込み論文を受用する方針であったが、実際に申込みされた論文を整理してまとめると、結局主要テーマは次のごとくになった。

- (1) large-scale dynamical-statistical and statistical forecasting (including stochastic-dynamic prediction).
- (2) recent developments in probabilistic and statistical forecasting.
- (3) long-range and climate forecasting by statistical methods.
- (4) statistical forecasting of rare or extreme events.
- (5) weather forecasting by dynamical-statistical and statistical methods.
- (6) model verification and forecast evaluation.

こうした6コの主要テーマの各々に1ないし2コ以上の session が設けられ、Lead speaker が各テーマごとに1人以上選定されたのであるが、このテーマ編成で容易に気がつくことは、(2)の提出論文の必要条件であった advanced technique の判断が困難なため、それがボカされたこと、および SDP (Stochastic-Dynamic Prediction) が片隅に追いやられ、その誤差伝播の問題が色あせてきたことである。

(昨年の統計気候学国際会議でも当初の「予報の品質管理」のテーマに対して応募者わずか1人で、それも、品質管理とはほど遠い研究発表であり、テーマ選定はかなり便宜的に行われていた。)

この6テーマが Session 1~17に分けられ、5日間にわたるシンポジウムとなったが、これをさらに筆者の見方でまとめると、次の4つになる。

- (1) 大規模現象の力学的かつ統計的な予報の総合展望と今後の開発動向。
- (2) 一般的な確率予報、統計予報(とくに長期予報)の技術開発。
- (3) 稀事象、異常現象の統計予報と天候変動予測。
- (4) 予報モデル検証、評価の方法論と検討。

なるべく、少なくともまとめた方が、「何を目的としてどんな方法が提示され、今後どうすべきか」が明らかになるので、敢て、この様にした。

実際 Session が17コもあって、目まぐるしく Chairman が交代してゆくと、何がポイントなのか、分からなくなってしまい、收拾に苦勞する訳で、最後の closing session で A.H. Murphy がまとめた要約を聞いたが、大部苦勞していた様であった(あとがき参照)。

シンポジウム究極の目的としては「ultimate objective of developing and applying more successful and useful forecasting models based on both dynamical and statistical procedures」と明示されているのに statistician が多すぎるために meteorologists と statisticians がどう co-operate してゆくべきか、お互に「理解しにくい用語や概念」をどう調整するかに問題が残された様である。

英仏同時通訳があって、通訳者がなかなかスムーズにやってくれたのは大助かりであったが、発表者のバラエティがありすぎてそのため統計学専門術語となると、通訳のアナウンスに時々苦笑する場面もあった。それもシンポジウムを和やかにする効果(?)と好意的にうけとってよいが、要するに何を言っているのか、筆者にもよく分かりかねるのもあった。(同じ英語でもこうバラエティがあるとそんな印象をうける。)

いつも感ずることだが「既存の研究や開発はここまでであり、自分はそれに対してこうやって一步すすめた、あるいはこういう新しい試みをやった。」といった対比が明瞭でないと、説得力のある研究報告とはうけとれない。

筆者の貧弱な語学力のためでもあろうが「何故そうするのか、そうすることで一步前進したのか」をはっきり断言された報告が少なかったが、ともかく筆者の見方による上記4コの主要テーマについて、報告された論文の要点を紹介しよう。

2. 大規模現象の力学的ないし統計的な予報

この分野の第一人者といわれる E.L. Lorenz は多変量線形回帰モデル

$$Y = X \cdot A + E \tag{2. 1}$$

$n \times m$     $n \times p$     $p \times m$     $n \times m$

(ただし  $m$  は予報対象次元,  $p$  は予報要因次元,  $n$  はデータ数で  $A$  は係数行列,  $E$  は誤差行列とする) で,  $E'E$  を最小にする解  $A=(X'X)^{-1}X'Y$  の適用可能性に多くの論評を加え, 線形モデルの限界→非線形化による精度向上策をもっとも単純な非線形モデル化

$$X_{n+1} = X_n^2 - 2 \tag{2. 2}$$

の補足で考察した(このモデルは初期値  $X_0 \rightarrow -2 < X_0 < 2$  とする限り, 白い雑音スペクトルをもつ). しかし, 彼の議論には実際の裏づけがなく, 往年の迫力からみて, 「年とったな」という印象をうけた. つづく C. Mante and G. Der Megreditchian にるよ 500 mb geo-potential field の自己回帰予報 (ヨーロッパ全域を  $15 \times 15$  格子でカバーし, 時間ズレ  $\tau$  をもつ共分散  $Cov. (X_i(t), X_j(t-\tau))$  の行列主成分20コをとり出して多元的自己回帰式をつくる) や S. Srivatsangam による北半球高度場  $Z_{it}$  の14~19日先への段階型回帰延長予報その他を聞いた限りでは力学的側面はほとんど入っていない. ただ, 中国からきた3人 (Shi Jiuen ら) は地衡風バロトロピック大気線形予報モデル

$$\frac{\partial \Delta \phi}{\partial t} + \alpha \frac{\partial \Delta \phi}{\partial \lambda} + 2(\alpha + w) \frac{\partial \phi}{\partial \lambda} = 0 \tag{2. 3}$$

(ただし  $\phi$  は流関数,  $\alpha$  は循環示標,  $w$  は地球回転角速度,  $\lambda$  は経度,  $\Delta$  はラプラスオペレータ) の右辺を  $f(\lambda, \theta, t)$  ( $\theta$  は co-latitude) とし, これに baroclinicity, 非断熱効果, 及び他の factors をとりこむため, これと流関数  $\phi$  を

$$\left. \begin{aligned} f(\lambda, \theta, t) &= \sum_n \sum_m \{ Q_n^m(t) \cos m\lambda + R_n^m(t) \sin m\lambda \} \bar{P}_n^m(\cos \theta) \\ \phi(\lambda, \theta, t) &= \sum_n \sum_m \{ A_n^m(t) \cos m\lambda + B_n^m(t) \sin m\lambda \} \bar{P}_n^m(\cos \theta) \end{aligned} \right\} \tag{2. 4}$$

(ただし,  $\bar{P}_n^m(\cos \theta)$  は Legendre 関数) として, 若干の理論的考察と数値計算方式をつくり, 力学と統計のカップリング案を示した.

T.A. Gleeson や C.E. Leith のように, SDP (Stochastic Dynamic Prediction) での予測対象である力学的量  $X, V$  の時間変化  $\dot{X}, \dot{V}$  から  $X, V$  の平均  $\mu(t)$ , 分散  $\sigma^2(t)$  の時間変化を支配する諸関係をつくり, その

predictability を検討することは既に前から数多く行われている. しかし,  $\mu(t), \sigma^2(t)$  の安定性ははっきりせず, 何日先まで予測可能かについて依然問題がある. つまり SDP では, 大別して

- (a) 物理量 (または力学的諸変量) の代わりにその平均, 分散を考察する
- (b) 力学的数値予報 モデル式の係数を確率変数とする
- (c) 力学的数値予報 モデル式の残差を確率変数とする

の3つのアプローチが伝統的に採用されてきたが, どれも短期 (1~3日) なら “定常としての統計的処理” でうまく行くが, 長期 (4日以上) では, “非定常としての統計的処理法がない” ためうまく行かない.

ここに “SDP は曲り角にある” という見解が生じ, 非定常のカベを切り開くか, 全く発想をかえるかの岐路にたっているという E.N. Lorenz の主張は正しいようだ. しかし, 彼の「非定常のカベを切り開く路線」はその若き後継者がいて強力にすすめない限り, むりであろう.

もちろん, 大規模現象に対し, モンテカルロ実験をしたり, Global な予測誤差モデルの提示などもあって, このトピックに挑戦する Statistician は多いが, 力学的予報との関連考察はそれほどなかった.

半球規模の高度場や, 温度場を多変量解析 (たとえば, 主成分分析, 重回帰分析など) の手法で, モデル化し, 表現するアプローチ (アメリカでの数人, 日本では広瀬元孝の試み) は, 「非定常のカベの切り開き」でなく, 発想をかえた統計的アプローチであり, 中期, 長期の大規模予報として, どこまで予報精度が向上するかに大きな関心がもたれている.

この他にもクラスタリング, 判別分析の応用の試みが報告されたが, 直接予報を意図したものでなかったので, ここでは省略する.

3. 一般的な確率予報と統計予報の技術開発

ここでは大規模現象とかぎらず, 一般の天気現象に対する確率予報, 統計予報の諸手法と具体例をとりあげが, 一言でいうと, “応用可能な手法の展覧会” という印象である.

- 一応筆者の見方で発表されたものを分類紹介すると,
- (a) マルコフモデル (N.A. Bagrov, I.B. MacNeill, P.P. Kamte, R.W. Katz ら)
- (b) ベイジアンモデル (R.L. Winkler, 鈴木)

(c) OPMM と適合モデル化 (G.W. Brier and B.E. Kelbe, J.C. Turlot and G. Der Megreditchian)

(d) 多変量回帰的モデル (I.T. Jolliffe, M. B. Carr, ら)

(e) ARIMA モデル (H. Wenjie *et al.*, L. Steinberg *et al.*)

(f) MOS 関連モデル (J.P. Javelle *et al.*, W.H. Klein and J.P. Dallavalle)

(g) 一般線形回帰モデル (鈴木)

(h) 非定常線形適合モデル (T.P. Barnett, G. Skoda)

(i) その他

となる。ここでは長期予報、異常現象予報をのぞいて統計手法をピックアップしたが、とても全部をとりあげる訳にはいかないのので、いくつか典型的なものを選定し、その考え方を重点に分かりやすく紹介しよう。

マルコフ・モデル、またはマルコフチェーン・モデルとは数年来アメリカで関心をもたれているもので、一昨年コロラドの NCAR で R.W. Katz らとも討論してきたが、明日雨が降る降らないの予報が対象となりそこでは、今日の状態か、せいぜい昨日の状況を知っていればよく、それ以前のことは知らなくてもよいとするモデルである。

現象記述の統計モデルとして一応興味あるが、このままでは予報につかえない。(雨を予報するのに“先行の雨”しか考慮せず、“雨の先行原因”を入れていないからこの点は(e)のモデルも同じ。何故なら ARIMA (Auto-Regressive and Integrated Moving Average) モデルも1時系列内の自己回帰と移動平均を組合せたにすぎないから。)

ベイジアン・モデルとは一言でいえば、非線形判別予報モデルで、従来の判別予報が線形予報式であったのを予報要因を条件とする予報対象の条件つき発生可能性(確率)の形で非線形化した試みで、“確率分布を設定”し得る位の十分なデータがあれば利用可能である。

(c) の OPMM とは One Parameter Multiplicative Model の略で、例えば先行予報要因  $X_1, X_2, \dots, X_m$  によって  $Z$  を予報するのに、

$$Z = K + f_1(x_1)f_2(x_2)\dots f_m(x_m) + \epsilon \quad (3.1)$$

といった“積”の形を G.W. Brier らが提示した ( $K$  は未知定数)。

これまでの“和”の形の予報モデル

$$Y = K + f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots + f_m(x_m) + \epsilon \quad (3.2)$$

では要因の積  $x_i x_j$  が直接入らないが、混合したモデル

$$\tilde{Y} = \alpha_1 f_1(x_1) + \alpha_2 f_2(x_2) + f_1(x_1)f_2(x_2) \quad (3.3)$$

は  $F_1(x_1) = \alpha_2 + f_1(x_1)$ ,  $F_2(x_2) = \alpha_1 + f_2(x_2)$ ,

$K = -\alpha_1 \alpha_2$  とおくと

$$\tilde{Y} = K + F_1(x_1) \cdot F_2(x_2) \quad (3.4)$$

といった“積”の形になるので、“和”のモデルより一般性をもつ。そこでこのモデルによる技術的手法開発とその Zonal Index 予報への応用例が G.W. Brier により示された(手法手順と応用例省略)。

(d) 多変量回帰モデルとは正準回帰、ベクトル回帰、多群判別分析及びクラスター分析(これは予報に使えないのに引用している!)のうち、応用できそうなものの子測向け修正モデルをいい、とくに innovative な展開ではない。

(f) MOS およびその関連モデル類については何人かの人がある総合展望と問題点をのべたにとどまり、とくに新しい方向が示された訳ではない。日本でも気象庁予報部などですでに業務化されているので、ここでは省略するが、W.H. Klein らにより示された PP (perfect prog) モデル、PE (Primitive Equation) モデルへ利用する MOS 技法の問題点整理と実例はたしかに参考になろう。

(g) の一般線形回帰モデルとは、予報要因中に前線、台風、低気圧の有無、状況を示す状態変量、風のようなベクトル連続変量、気温、等圧面高度、のようなスカラー連続変量の3つが同時にあっても、予報対象  $Y$  (状態変量、連続変量のどちらでもよい)を統計的に予報できる仕組みをしたもので、 $Y$  を面積雨量とした実例を鈴木は示した。残念ながら応用例が少し古いもので、要因の数とデータ数が少ないため、予報精度(例えばスキルスコア)が今のところ十分でなく、この点の2、3の質問があったが、方法としては innovative であると思われる。

この他、いくつかの非定常線形統計(回帰的)モデルが提示されたが、それも非定常化という複雑なモデル化の割に予報精度がとくによくなったとはいえない。この非定常線形化モデルの簡単な一例として T.P. Barnett の提示したものがあり

$$\text{予報要因: } X_\alpha(t) \quad \alpha = 1, 2, \dots, k$$

$$\text{予報対象: } Y(t+q) \quad q > 0$$

とするとき線形予報モデル

$$\hat{Y}(t+q) = \sum_{\alpha} X_{\alpha}(t) [E_{\alpha 1} + E_{\alpha 2} \cos kt + E_{\alpha 3} \sin kt] \quad (3.5)$$

で係数つまり [ ] 内の項が時間  $t$  とともに変化していく非定常モデルをいう。これは北米での気温季節予報などに応用されている。

以上の確率予報と統計予報の研究報告をきいて、全般的に感じたことは要するに

(i) 現在の線形予報(つまり線形回帰, 線形判別による予報)ではなかなか精度があがらない。

(ii) そこで、非線形化, 非定常化, 一般線形化といろいろ工夫されているが、そうした複雑な一般化しただけの精度向上についてなお模索中である、ということである。

4. 気候予報, 長期予報と稀現象の予測方式

今回のシンポジウムでは、気候予報や長期予報がかなり重視されたのが特色で、10人以上の報告者が Session No. 9, 10, 11, 12 でそれぞれの成果をのべ、諸手法についての情報交換を行なった。

その予測方法を大別すると、

- (a) 非定常予測モデル (T.P. Barnett)
- (b) Stochastic-Dynamic 予測モデル (E.P. Barisenkov, S. Jiuen, D.M. Sonechkin, ……)
- (c) ARIMA 予測モデル (H. Weinjie *et al.*, L. Steinberg)
- (d) 多変量解析的モデル (T. Andreeva, E.C. Kung and T.A. Sharif, M. Hirose *et al.*)
- (e) その他の予測モデル (R.W. Preisendorfer, G.V. Gruza and E.Y. Rankova, R.K. Verma, D.L. Gilman *et al.*)

となり、この他に気候(長期)予報の Verification テクニクがいくつか発表された(次節参照)。

このうち(a)の季節変動を扱う Lead paper を提出した、T.P. Barnett の方法は、すでに前節でのべたように、線形回帰予測モデルで、その係数が、時間  $t$  とともに変動する形で、変形すると、

$$\begin{aligned} \hat{Y}(t+g) &= \sum_{\alpha} X_{\alpha}(t) [E_{\alpha 1} + E_{\alpha 2} \cos kt + E_{\alpha 3} \sin kt] \\ &= \sum_{\alpha} E_{\alpha 1} X_{\alpha}(t) + \sum_{\alpha} E_{\alpha 2} X_{\alpha}(t) \cos kt + \\ &\quad \sum_{\alpha} E_{\alpha 3} X_{\alpha}(t) \sin kt \end{aligned} \quad (4. 1)$$

で、 $X_{\alpha}(t) \cos kt$ ,  $X_{\alpha}(t) \sin kt$  をそれぞれ予測要因  $U_{\alpha}(t)$ ,  $V_{\alpha}(t)$  とおけば、結局「定常モデル」となり、別にわざわざ非定常という程でもないだろう。

中国の S. Jiuen らは流関数などの他に北半球 500 mb 月平均高度場  $H(\lambda, \theta)$  をも球関数展開

$$\begin{aligned} H(\lambda, \theta) &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=m}^{\infty} (A_n^m \cos m\lambda + B_n^m \sin m\lambda) \\ &\quad \times \bar{P}_n^m(\cos \theta) \end{aligned} \quad (4. 2)$$

で表現し、さらに温度 anomaly 場も球関数展開し、Legendre 関数  $\bar{P}_n^m(\cos \theta)$  による平均運動エネルギーの表現を考察し、つぎに、中国大陸全域に亘る平均気温 anomaly の多変量解析(因子分析, 正準相関分析, クラスタ分析)を行ったあと、有効な physical factor をつかって長期予報をするのに long range NWP の準備下で行う提案をした。

一方、ソ連の E.P. Borisenkov や D.M. Sonechkin も別の Dynamical Stochastic approach を長期予報向けの形で提案した(代読)。

(c) の ARIMA 予測モデルとは気温, 降水量 anomaly の季節予報のために移動平均的残差を伴う自己回帰的予測式を

$$\begin{aligned} X_t &= \varphi_1 X_{t-1} + \dots + \varphi_p X_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \dots \\ &\quad - \theta_q a_{t-q} \end{aligned} \quad (4. 3)$$

で表現するものを用いる試みであり、このオーダー  $p$ ,  $q$  をきめるのに AIC (Akaike Information Criterion) 基準を採用している。H. Wenjie ら4人による実際予測と実測との対比例(Beijingの場合)や、L. Steinberg による北半球規模での 500~1000 mb の anomaly 場, thickness, 地上気温の予測図が示されているが要するに時系列解析的な予測である。(後者では有名な Box-Jenkins 方式も併用された。)

(d) 多変量解析的予報としては、E.C. Kung and T.A. Sharif によるインド夏のモンスーンパターンの重回帰的予報実施例、同じ方向でインドの R.K. Verma and P. P. Kamte による夏のモンスーン時期における geo-potential 高度, 気温, 風の統計予報実施例が報告され、さらに広瀬元孝による北半球高度場の大規模な成分分析による逐次1ヶ月予報技術の提示があり、多変量解析におけるいくつかの手法応用が着実に進展しているようであった。M. Wodzinska (ポーランド) は、これを情報理論の立場で定式化したモデルを示したが、多変量解析を別の見方で整理したものといえる。

A.V. Meshcherskeya (ソ連) らは、長期予報の方法として complex physical statistical method を提示した(出席されなかったので内容不明)。

(e) その他の方法として Lead speaker であった D.L. Gilman はアメリカの1964年における長期予報の状況を要約報告したが、要するにアメリカの基本は

“Stepwise regression と time series 技法”の2つが中心で他の方法も若干加味されていると述べた。

最後に稀現象 (rare event) や極値的現象 (Extreme phenomena) の予測が今回初めて取り上げられたが、ここでは G.D. Megreditchian (フランス), M. Ahmad (サウジアラビア), J. Nordø (ノルウェー), G. Skoda (ウィーン) らが、この予測方法について報告した。

まず、G.D. Megreditchian は連続変量に対してマハラノビス距離を出発点とする若干変形された判別解析的モデル、離散的予測対象変量に対してベイズ的判別方式の変形修正ならびに古典統計的決定理論との結合モデルを応用し、極値推測手法とリンクする “profiles method” なるものを1つのアイデアとして示した (その詳しい定式化はここでは省略する、これらの応用例はコンピュータリスト化されてスライドによる説明であった)。

M. Ahmad は稀現象を適宜整理すると「離散確率分布モデル」で扱うのがよいとし、たとえば R. Katz (1963) が提示したいわゆる Two-parameter family of discrete distributions with pgf (probability generating function)

$$g(z) = \left[1 - \frac{\beta}{1-\beta}(z-1)\right]^{-\alpha/\beta} \quad (4.4)$$

$$\alpha > 0, 1 > \beta > 0$$

からスタートして興味ある統計的考察をし、パラメータの推定論はのべられたが、“稀現象自身の予測” までには到っていないようである。

J. Nordø は単純マルコフ過程モデルを応用し、ある稀現象がいつおこる確率などを定式化し、大標本 ( $n \geq 100$ ) の場合に対する1つの近似式をつくり、具体例を示したがこれは予測そのものでない。

G. Skoda は降水量の Extreme rate に関する非線形予測のため、W.H. Klein ら (1959) による PPM (Perfect Prog Method) と、H.R. Glahn (1972) による MOS (Model Output Statistics) を出発点として、これに R.G. Miller (1964) による REEP またはその弱点を修正したといわれる SLAM をアルゴリズム化し、非線形予測因子 (Non-linear Predictor) をとり入れた予測方式を業務化したと報告したが、実際操作 (practical handling) の面で不明な点があり、要するに日本でよく用いられてきた “予報用ワークシート” にある要因を2乗したり、さらに適当なウェイトをつけて指標  $I$  をつくり、これがある値以上か以下かで稀現象の判断および予測をするものと理解すべきであろう。

## 5. 予報の信頼性、検証と評価について

この点については Session No. 6, 7, 8 及び No. 16 の最後で報告された。一応分類すると、

(a) 全体的評価論と予報の最適利用 (W. Silvert の Lead paper)

(b) 数値予報、長期予報の検証 (J. Rinne, R.C.J. Somerville, A. Lange *et al.*)

(c) 統計予報 (確率予報) の検証 (H. Daan, R.W. Preisendorfer, G.V. Gruza and V.T. Radyukhin, I.B. Mason, P. Saarikivi *et al.*)

(d) 検証と評価の統計的問題 (D. Rousseau, A. Murphy, A.R. Boehm *et al.*)

となる。

W. Silvert は各種天気予報の評価法全般を展望し、“簡明直裁の指標”をつくり、利用者へ提供するとともに最適利用をすすめた。たとえば、気象要素  $X$  の確率的予報では、その経験的出現確率  $P(X)$ 、予報確率  $\pi(X)$  に対し、 $S(X) = \pi(X) / (\pi(X) + P(X))$  が、最良指標 (best form) であり、情報論的指標  $I = \log_2 [\pi(X) / P(X)]$  は必ずしも簡明直裁な最良指標でないという。(しかし明らかに  $S(X) = 1 / (1 + 2^{-I})$  であるのだが!) この他いろいろな採点法 (Scoring rule) やかたより (Bias) をもつ予報の Risk についても多くの示唆的見解を示したが、その Summary をみるとやや独断的と思われるところもある。

(b) については J. Rinne は北歐 (スカンジナビア) での数値予報検証で、一種の図上実験からよく fit する検証実験式の一案を示すとともに、回帰及び判別概念にもとづく別の検証モデルを示したが、結局、最終的な定式化で、簡明な3つの “検証用実験式” をつくった (それらの実験式はここで省略)。

R.C.J. Somerville (カリフォルニアのスクリプス海洋研究所) は超長波予報の検証用としてパタン認識技法を提示している。A. Lange (ヘルシンキ) の発表は NWP の現業的実況報告でとくに検証という程のものではない。

(c) については H. Daan (オランダ) が2次形式的検証スコアと予報時間 (実際の何時間前の予報かを示すもの) を入れた検証スコアの一案とその具体例を自国のデータで示したが、とりたてて新方法という程のものではない。

R.W. Preisendorfer (NOAA) は予報と実況の対比分割表をつかって “できるだけ当てようとする確率予報者

(Adaptable Stochasters)” のとるべき態度を示し、少なくとも持続性予報を上廻るよう措置する技術 (skill) を提示したが、よく分からなかった。また、G. Gruza と V.T. Radyuklin (ソ連) は確率予報の評価基本問題にふれ2つの大変興味ある検証アイデアを示した。その1つは統計的仮説検定論における、Pitman の ARE (Asymptotic Relative Efficiency) を変形した統計量の導入で、他の1つは多者択一的予報に必要な多項分布における検定力関数 (power-function) の導入である。後者はさらに A-method, B-method として技術化されるので、大変興味深い新アイデアか? と思ったが、本人がこれらできなかった (代読)。

I.B. Mason (オーストラリア) はこれまで警報確率と適中との関係を示すために用いられたグラフつまり ROC (Relative Operating Characteristic) の図上検討からスタートし、尤度比規準、

$$L(X) = f_{SN}(X) / f_N(X) \quad (5.1)$$

およびベイス法則

$$P = \left( 1 + \frac{1}{L(X)} \cdot \frac{1 - P_0}{P_0} \right)^{-1} \quad (5.2)$$

を yes/no の確率予報評価モデルとして示し、いくつかその具体例をあげた。

(ただし、 $P_0$  は adverse weather の先験確率、 $P$  はその予報確率、 $f_N(X)$  は予測要因  $X$  の分布密度、 $f_{SN}(X)$  は adverse weather への signal となる要因  $X$  の分布密度で、これはよく知られたロジットモデル (Logit Model) に他ならない。)

P. Saarikivi (フィンランド) は有名な確率予報検証用の Brier Score と、従来の Skill score の適用事例を数多く示してくれた。

(d) については、従来の4つの Verification Score (Ratio, Threat score, Hansen and Kuiper's skill score, Heidke's skill score) を具体例によって図上検討した上で、新しい自分の Score

$$I = \frac{4ad - (b+c)^2}{(2a+b+c)(2d+b+c)} \quad (5.3)$$

を提案し、その有効性を強調しその意味を考察した。これは yes/no の二者択一予報で、予報と実況の対比が第1表のようになっているときの新スコアであり、この  $I$  は (0, 1) の間にあって0に近ければ予報技術低く、1に近ければ予報技術高くすぐれているとした (この理由については省略)。

この他 A.R. Boehm (USAF) は、予報の検証という

第1表 予報, 実況の簡単な対比モデル

	予報	yes	no
実況			
	yes	$a$	$b$
	no	$c$	$d$

よりも量的予報における誤差分布モデルを考察し、これまでよく平均0、分散有限の正規分布が用いられてきたが、それは、気象予報の場合必ずしも妥当ではない (温度、視程、雲量などは本来 bounded value しかあり得ないから) とし、その代わりに TRP (Transnormalized Regression Probability) モデルの誤差分布を前提とすべきであると主張した。つまり  $\tilde{y}$  を気象値  $\bar{X}$  の気候学的分布から得られる equivalent normal deviate,  $R$  を観測値と予報値との相関とすれば、

$$e = \phi[(\tilde{y} - R\bar{X}) / (1 - R^2)^{1/2}] (1 - R^2)^{-1/2} dy/du \quad (5.4)$$

が誤差密度 (error density) であるとした (ただし  $\phi$  は正規分布関数の縦軸とする)。この研究発表では Abstract のみで本文のプリントはなく、何故  $R$  がほとんど Markovian なのか?  $\tilde{y}$  と  $y$  とのちがいが  $u$  は何か? といった説明がなく、よく分からなかった。

(しかし、誤差分布が正規分布でなければ、適当に境界 (bound) をきめて切断された正規分布 (truncated normal distribution) にすればよいので、何故この  $e$  をもち出してきたか、その理由がどこにあるかが分からなかった。)

最後に A.H. Murphy (アメリカ) は、当日配布されたプリントで、10数年来にわたる自分の研究概要をのべたあと、最近、彼らのグループで実施された3つの実験 (作業を含む) 的テスト研究結果について詳しく報告した。第1に降水確率予報作業 (PoP 他)、第2に気温の階級区別予報実験 (MOS システム他)、第3に確率的トルネード予報実験 (MOS をベースとする方法他) であって横軸に予報確率、縦軸に実測値をとったグラフ上での比較が克明に行われた。Murphy 自身が遠慮勝ちにいつているように “主観的な不確実性モデル実験” だが、今後の予報検証モデルの開発と統一に有力な示唆を与えるものであろう。

(この他にも2, 3の研究報告があったが、誌面の都合で省略する。)

## あとがき

以上の他、エクマン層 (Ekman layer) 擾乱の予測など、やや特殊なテーマについて研究報告がなされたが、ここでは省略する。

これまで紹介したように多種多様な研究報告があったので、最後の要約および今後の可能な具体的活動方向の提案について Program chairman であった A.H. Murphy は大変苦勞していたようだ。シンポジウム終了後に Summary of recommendation for possible action by WMO としては主要なまとめを含む形で次のようになった。

1. 予報検証方式についての標準的なガイドラインの作成刊行。
2. 主要な統計的手法トピックス (主成分分析法や時系列分析手法など) に関する刊行物準備と統計用語解説版作成。
3. 確率的または統計的予報に関する協同研究、協力体制づくりと教育。とくに発展途上国の要求や関心を考慮に入れたこのための計画推進。
4. 予報に寄与し得る確率的かつ統計的方法や概念の理解を推進させること (次の例参照)。
  - 例 1 モンテカルロ実験。
  - 例 2 大規模予報用解析。
  - 例 3 大規模数値予報モデルを基盤とする統計予報。
  - 例 4 統計的モデル化。
  - 例 5 天気予報の不確かさの定量化。
  - 例 6 予報の改善ならびに精度向上に関する統計的経済的意義の明確化。
5. その他研究発表と討論の間に得られたいくつかのコメント。
  - (a) 1980年9月1～5日のジュネーブでひらかれた長期予報専門家会議との密接な関係をもつ希望

と1982年にジュネーブで開催予定の長期予報研究会推進。

- (b) 長期予報を含む統計予報に関する活動中心が WMO から公式提案され、多くの有力メンバーがこのために参加し協力できる関係が得られ大変よかった。
- (c) 日本の気象研究所に新設された大型計算システム日立 M200H の多面的な利用と協力推進。
- (d) サウジアラビアで、長期予報、気候予報のトレーニング目的を内容とするワークショップ開催可能性提案。

こうして閉会した後も、レセプションやら各国参加者間のなごやかな交流やらがあったが、これを契機に、日本の確率予報 (統計予報) も着実に業務化され、同時に諸外国の研究報告の中から、日本にとって応用可能なものを積極的に導入する機運が高まることを期待したい。

この報告は下記の文献、WMO 鈴木信雄によるコピーメモと筆者のメモにより作成したものである。

各研究報告についてさらに詳しく知りたい方は文献を読んで頂きたい。(ロジックモデルなど、確率予報用諸モデルの統計理論的考察は一応鈴木 (1972) に要約されており、ここではそうした数式的部分をすべて省略した。)

## 文 献

- 鈴木栄一, 1972: 確率予測に関する方法論的一考察, 青山経済論集, 24, 1-42.
- World Meteorological Organization, 1980: The Collection of Papers presented at the WMO Symposium on Probabilistic and Statistical Methods in Weather Forecasting (Nice, 8-12 Sept. 1980)