

# 大気科学における確率統計の国際シンポジウム\*

鈴木 栄 一\*\*

## はしがき

上記シンポジウムがアメリカ気象学会と WMO の共催で本年6月1～4日にハワイで開かれ、日本から小河原正巳(東京女子大)、石原健二(国際コンピュータ・サイエンス)の両博士と筆者が出席して研究報告を行なった。このシンポジウムでは一応 (1) Stochastic Dynamic Prediction (2) Time Series Analysis (3) Probability Forecasts の3分野に重点がおかれたが、その他の興味ある応用研究で、new and innovative approach の論文が受理されただけに、内容的には可成り充実していたと考えられる。以下、シンポジウムの概要を報告する。

## 1. シンポジウムの経緯とプログラム

このシンポジウム企画は1968年の第1回アメリカ気象統計国内会議直後から Program Chairman R.H. Jones 教授(ハワイ大学)を中心にすすめられてきた。

筆者が気象研究所在籍当時に、日本で開催できないかとの問い合わせがあり、気象学会の方や関係方面の意向を確かめている間に、精力的なアメリカ気象学会のこの分野のメンバー十数人が集まって協議し、1970年2月にこの企画をきめ、筆者に連絡してきた。1970年8月筆者がハワイ大学を訪問し、村上多喜雄同大学教授、Jones 教授と会った際、プログラム構成とアメリカ以外の諸外国代表招待の方針が示され、協力を求められた。Jones 教授が9月の京都国際会議(System and Circuit Conference)出席のため来日され、日程、場所、参加予定国を知らされると同時に日本気象学会への連絡がなされ、一方 P. Julian (National Center of Atmospheric Research) らによるプログラム準備態勢がととのったのである。

実際の参加者は講演予定者56人(うち4人欠)の他に約10人で、そのうち45人がアメリカ本土からでこれにオーストラリアの P.A.P. Moran 教授、イスラエルの K. R. Gabriel 教授、ノルウェー気象研究所の J. Nordφらを含めこの分野で活躍している人達の大部分が集ま

た。プログラムの部門としては論文題目を arrange した結果、

Stochastic-Dynamic Prediction

Turbulence

Time Series Analysis

Probability Forecasts

Special Session on Four-Dimensional Data Assimilation

Precipitation Statistics

Techniques and Applications

の7つとなり、各部門で3～6篇の論文が報告され、熱心な討論が行なわれた。何といてもアメリカの参加者が圧倒的に多く、論文のレベルは大差ないとしても気象統計に対する意欲的な研究はアメリカでもっとも盛んであるといえよう。

プログラムから判断される特徴としては

- (1) 取上げられたテーマは極めて多種多様で、1人ごとの部門も完全に理解できないくらいである。
- (2) 講演者の所属も多方面にわたり、大学、研究所はもちろん、国立の各気象機関、民間のサービス機関(コンサルティング)、航空会社、海洋研究所などにおよんでいる。
- (3) 用いられている手法も多変量解析の回帰分析、スペクトル分析、実験計画、シミュレーションモデル、など広汎で、いずれもコンピューターをフルに活用したものである。

といった諸点があげられる。

つぎに各部門ごとの論文のアウトラインを示そう。

\* Outline of International Symposium on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences.

\*\* E. Suzuki, 青山学院大学経済学部

—1971年7月26日受理—

## 2. Stochastic-Dynamic Prediction

この部門では5つの論文が提出された。

小河原正巳博士の非線型確率微分方程式に関する報告はむしろこの部門でなく、時系列解析の部門のもので、最近話題となっている非線型確率過程のうちDegenerate parabolic 方程式の解、逐次近似解を数学的に厳密に扱ったものである。(Kolmogoroff 方程式～Van Der Pol 方程式のモデル例が取上げられ、図示された)

Thomas A. Gleeson は Dynamic model の flow pattern を Lagrange の方法、Euler の方法で簡潔に表現し、誤差分散を明示して Prediction の限度を数量的に扱った。つまり、予測したい物理量  $X$  の初期値  $X(t_0) = X_0$  の network sample model では分散  $\sigma^2(X_0) = 0.056 \times (\text{network の面積}) / (\text{network 内の観測点数})$  とし、 $X(t)$  の予測精度に相応する分散  $\sigma^2(X)$  が  $(t-t_0)^2$  に比例して拡大するとの仮定下で、2つの方法での  $\sigma^2(X_0)$ ,  $\sigma^2(X)$  が12時間予測、24時間予測でどのくらいの数値になるかをモデル的 flow pattern で検討した。Rex J. Fleming は Stochastic な dynamic energy model をつくり物理的な uncertainty の仮定から出発し、2次、3次モメントの時間的変化  $\dot{\sigma}_{ij}$ ,  $\dot{\tau}_{jki}$  の評価を Quasi-normal closure, および Eddy-damped closure で行なう方法を論じている。やはりこの部門での報告として Harry R. Glahn と3人の協力者による数値予報モデルの統計学があった。これは降雨の確率予測のため、有効な予測要因 (binary predictors) を、Screening Regression 方式にくみ入れて現業化し、一部分をシステム化したものの報告で、予測の成績はよく知られた

$$\text{Brier Score} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2$$

で丹念に調べたものである。ただし

$N$  = 全予測回数,  $F_i$  = 降雨予測確率,

$O_i$  = 実際結果 (降雨有ならば1, 降雨無ならば0)

この他にも最高気温の予測をも重回帰式で行なっており、その限りでは必ずしも数値予報モデルという訳ではない。予報対象区域はアメリカ東部である。要するにこの部門の本来の目的が

「学術的予報式を適用したときの予報精度を確認し、それを向上させるために、確率的 (Stochastic) な考え方を実際モデルに即応しつつ導入する」

にあることは1968年の第1回会議で指摘されていたが、今回の報告ではまだ、必ずしも方向づけが十分安定せず、試行錯誤の段階にあることが感ぜられた。

## 3. Turbulence

この部門は当初の予定になかったが、論文が3つ提出されたために追加された。C.W. Van Atta は風速の確率分布とモメントについて統計的処理をし、self-similarity の仮説を実験的に検討し、W.B. Miller らは風速の鉛直分布のベキ法則について New Mexico での実験結果をもとに統計的に扱い、 $U(Z) = U(Z_r) \cdot (Z/Z_r)^p$  における  $p$  の logarithmic estimate 方式を提出した。

また W.G. Tank と C.I. Beard はスモールスケールの風の擾乱を長い baseline 測定 (電磁気学的測定) から推定し、パワースペクトラムをもとめているが、baseline system とは

$$\bar{x}(t) = S^{-1} \int_0^s x(\hat{r}, t) ds$$

がもめられるよう予め設定されたもので、これより  $\langle \bar{x}(t) \cdot \bar{x}(t+\tau) \rangle$  などをもとめ、自己相関とスペクトラムが推定できるようになっているシステムである。この部門の報告は筆者にもよく分らない面もあるが、従来の乱流統計論で得られている知見を超えていないようである。

## 4. Time Series Analysis

この部門は多変量解析手法の導入、コンピューターの利用によって気象の時系列解析の現状と発展方向を見定める目的で重要視されている。

まず、R.H. Jones は時系列のスペクトラム分析に関する一つの展望をのべた。

よく知られている Blackman-Tukey の方法、Parzen の方法をのべ、著者数年来の研究である Spectral window の意味と他の考え方の関連を論じ、スペクトル推定にもとづく仮説検定 (たとえば定常性検定) の方法と具体例を Red noise をもつ場合の simulation 実験によって与え、観測値に欠測が含まれている場合、不等間隔時系列の場合についても考察しているが、赤池弘次 (統数研) のパワースペクトルを半自動的に推定する方法などが引用されていた。

B.M. Misra は Global な気圧分布の IGY 期間 (1957年7月1日～1958年12月31日) における 188 地点地上データによる時系列解析を詳細に行ない、4～5日の周期をもつ Oscillation が比較的卓越していることを論じた。Jenkin & Watt (1968) のスペクトル推定法が用いられ、南北両半球の各緯度圏にそった詳しい結果、代表的な地点別の結果が図示されているが、とくに新しい事実は見つかっていない。

P.R. Julian は主として 850mb～200mb 面の V-Co-

ponent の Spectral intensity を克明に計算し、とくに丸山健人が行なった赤道上空の風のスペクトル分析との比較を行ない、Synoptic-scale の tropical meteorology の研究における非定常な波動の統計的研究について関心を示した。(日本では、柳井、丸山、松野の諸氏がやられているようだ)。

K.G. Bauer は多変量時系列としての線型回帰予報がどのくらい気象予測に 응용できるかを具体的に示すため、北半球における 1951~1966 年間の 469 gridpoints における 700 mb 高度読取値の長大なデータを用い、Jones (1964) の方法に従って計算した。前提となる解析としては (i) Fourier-Bessel Representation (ii) Eigen vector Representation の 2つが用いられ、持続性だけに依存する予測、気候学的な予測との比較において予報の標準誤差、Skill Score とともに少しよいことが示されたが、格段により成績でなく、予報方式の改善が望まれる。予報は 1~6 日先に対して試験的に行なわれている。

H.C. Fritts は北半球における気候変動の anomalies を年輪の状況をもとにして多変量解析することによって調べた。一方、北半球気圧分布の逐年変動についても多変量解析を行なった。方法は基本的には  $i$  点の  $j$  年の値  $X_{ij}$  をもとに  $\bar{X}_{ij}, \bar{X}'_{ij}$  の固有値と固有ベクトルをもとめるもので、いくつかの興味あるパターンが得られている。

E.P. Avara は時系列データの分散分析 (AOV) を 1 元配置で行なう方法と応用例を示した。N コのデータにおけるモデルと実際値のちがいを示す誤差  $e_i$  ( $i=1, \dots, N$ ) に対し、White noise の場合および

$e_{i+1} = \rho e_i + \text{random error}$  ( $0 < \rho < 1$ ) という Red noise の場合について  $\chi^2$ -検定する方法と検定のために必要な図表 (P と N に関する Criterion を示す図) を作成し、若干の具体例 (単純な自己回帰モデル) を示した。この考え方は一部すでに R.V. Hogg and A.T. Craig (1965) によって示されており、ここではそれを拡張し、実用化する試みを発表した。

さらに B.T. Miers と E.P. Avara は時系列の線型トレンドを統計的に比較する方法と静力学の式  $dp = -\rho g dz$  から変形して得られるモデル的回帰式への応用例をも示した。要するにこの部門では興味あるいくつかの方法論と応用例が報告されたといえる。

## 5. Probability Forecast

この部門は Categorical な予測とその利用効果を検討

することに主眼がおかれ、いくつかの発表があった。まず筆者は R.G. Miller が 1968 年提唱した多重回帰による直接的確率推定予測式である REEP (Regression Estimation of Event Probability) の欠点を補正するための方法論をのべ、さらに対策コストと損失の和の期待値であるリスクを最小にする問題を考察し、応用例をいくつかのべ、R.L. Winkler と A.H. Murphy は Bayes の事後確率定理を工夫、変形して情報の Sequential な利用による確率予報式の改善に関する定式化を試み、予報の Utility measure を論じている。

J.C. Thompson は相変らず大げさな表現で、Scientific advance と予報の Operational improvement を総合した Potential Economic Gain および、最適行動決定を論じたあと、コスト、ロスに関する 2, 3 のモデル的仮定で Ceiling height の予報評価を数量的に簡単化してのべた。

A.H. Murphy は Probability Forecast の精度と価値をきめるため、Validity measure

$$V(\underline{r}, \underline{d}) = 1 - (1/2) \sum_{i=1}^N (r_i - d_i)^2$$

とこれより期待値として得られる Utility measure

$$U(\underline{r}, \underline{d}) = \sum_i \delta_j (\sum_i d_i u_{ij})$$

の必要性と方法論体系化を考察している。

ただし、 $(r_1, \dots, r_N)$  は N コの State に対する予報確率 ( $\sum_{i=1}^N r_i = 1$ )、 $(d_1, \dots, d_N)$  は実際結果でどれかが 1 他は 0、 $\delta_j$  は適中のとき 1、他は 0 なる係数、 $u_{ij}$  は State 出現と予測したとき実際に State  $j$  が出現した場合の経済効果である。いろいろ Procedure をのべているが、統計的決定理論ですでに得られているものを焼き直したようにしか受取れなかった。

K.C. Crawford はマルコフチェーン Model を確率予報に利用する試みを Computer でいろいろ行なっている。風の子報でうまくいったと主張しており、Decision Theory との関連にも言及しているが、筆者の Minimum Risk に対する別な Approach として興味があった。

W.H. Klein ら 4 人はその共同研究として降雨確率の automatic な予測を全米各地域で行なう Operational な方法と長大な実施例を詳しく報告した。基本的には、石原、鈴木による多重回帰予報方程式と同じであるが、automatic に行なうための Screening experiment の技術的工夫、12 時間降雨予報値の分布パターン作成用 Ope-

rational system の確立 (86点 Network に対す Verification と Calibration technique の検討も含まれる) など, かなりの大型計算機による確率予報ルーチン化への積極的意気込みが感ぜられた。

#### 6. Session on Four-dimensional data assimilation

この部門は本来気象データの時間的, 空間的分布状態を統計的に解析し, いくつかの特徴をピックアップすることを主な目標とする。

A. Eddy は GARP 計画の一環として, 直線, (平面) や多項式 (多項式表現による曲面) の適用を含む, 一般化した Objective analysis を行なった。Computer により, 大がかりな解析結果があるそうだが, この講演ではいくつかの例が簡単にのべられた。

D.S. Crosby らは Satellite 測定値に应用するため, 共分散行列の小行列特性の検討, Planck function がのべられたが, 筆者にはよく分らなかった。

この他に F.B. Muller による上層観測網の測定誤差の決定方式の手段となる統計的方法の提示, R. Thompson による Grid point の irregular な配置の Speckle 推定に及ぼす影響の考察 M.C. Yerg による不等間隔データによる調和分析の経験的信頼限界作成法の研究などがのべられた。Computer の発展により, この部門でも今後いろいろの興味ある研究がでてくるようである。

#### 7. Precipitation Statistics.

降水量や降水現象, 降雨分布は依然として統計解析の好対象であり, この部門でもいくつかの報告がなされている。

K.R. Gabriel (イスラエル) は55地点における月降水量地理的分布の Cluster 分類を行なうための1つの方法として Canonical decomposition を提案した。55地点, 9ヶ月の月降水量偏差行列  $Y$  ( $55 \times 9$  行列) に対し,  $YY'$  と  $Y'Y$  の第1, 第2固有値  $\lambda_1^2, \lambda_2^2$  と対応する固有ベクトル  $p_1, p_2, q_1, q_2$  をもとめ,  $9 \times 2$  行列  $(\lambda_1 q_1, \lambda_2 q_2)$  の列  $h_1, \dots, h_9$  と  $55 \times 2$  行列  $(\lambda_1 p_1, \lambda_2 p_2)$  の列  $g_1, \dots, g_{55}$  との組合せにより Biplot という手続きをへて降水分布パターンを表現し, 分類する方法を Canonical decomposition と名付けた。成分々析と似た考え方であるが, この方が Graphical にも便利であることをいくつかの実例でのべている。(よく分らない点もある)

P.A.P. Moran (オーストラリア) は人工降雨実験を統計的に確かめるため, ある時系列的な  $2n$  期間のうち,

seeding の行なわれた  $n$  期間, seeding の行なわれなかった  $n$  期間の平均の差の有意性をしらべる方法論を提出した。この場合の時系列は単純マルコフ型で  $X_i$  と  $X_j$  の相関係数  $\rho_{ij}$  が

$$\rho_{ij} = \rho^{|i-j|} \quad (-1 < \rho < 1)$$

であるとし,  $\bar{\rho} = \sum \rho_{ij} / 2n(2n-1)$  が必要であるので  $\rho = 0, 0.4, 0.6, 0.8, n = 10, 20, 50, 100$  に対する  $\bar{\rho}$  を上の仮定下でもとめ, 最終的に平均のちがいを検定する問題を扱った。

P.T. Schickedanz は降水量度数分布の理論モデルとして Log-normal type と Gamma type をとりあげ, 夏の日雨量, 時間雨量について分布のパラメーターを実際にもとめ, 年間, 年内, 日内の変動についての分散分析を行なったが, これはすでに早くから筆者によって研究されてきたもののアメリカ版であってとくに新しい報告でなく, 筆者の Hyper Gamma 型のあてはめ etc. を含めコメントを提出しておいた。

S.A. Changnon と P.T. Schickedanz は人工降雨成果を評価するため, 平均の差の有意性を  $t$ -検定で行なうという単純な方法で計算した豊富な例をいろいろあげていた。

F.L. Ramsey と W.P. Elliott はオレゴン海岸での Pulse-seeding system による降雨観測記録の時系列分析 (Fourier 分解の結果など) を行なった報告をしたがとり立てていうほどのものではない。

#### 8. Techniques and Applications

ここは種々の統計技法とその気象への応用を報告する部門で, 1.~7.に入らないものとなっていた。まず

C.E. Buell は Battery Mackenzie 上のロケットゾンデによる風の観測 (1966年9月~1968年9月;  $0.05^\circ, 3.55, 6.10, \dots, 58.0, 60.0$  km の各高度) の記録を風速成分に分解し, 1, 2,  $\dots$ , 10日 lag に対する各成分ごとの相関行列をもとめ因子分析をした。ここでの因子分析は成分々析と全く同じで, いくつかの興味ある事実が図示されたが, 統計技法として何等新しいものではない。

R.O. Duda ら4人は自動 Ceilometer system による雲の simulation model について報告した。

雲量, 雲底を Ceilometer で測定する自動記録装置によって得た過去のレコードを統計的にしらべ, そのあとで統計的に homogeneous な雲の layer を simulation でいくつか発生させ, 雲の base-height プロファイルの自己相関モデル

$$R(X) = h^2 + \sigma_b^2 e^{-|x|/d}$$

などの数値実験的妥当性検討を試みている。

ただし

$X$ =base-height profile における距離間隔

$\bar{h}$ =base-height の平均値

$\sigma_b$ =base-height の標準偏差

$d$ =定数 (base-height の高さに depend する)

Cloud simulation model→Computer program の興味ある報告がなされ Simulation の結果と実際記録の関連についてもいくつかの報告が Preprint にあるが、当日出席されなかったので詳しいことは分らずに終わった。

I.I. Gringorten は時系列的な気象データのモデルとして  $\rho(\tau)=\rho_0\tau$  という単純マルコフ型である場合の条件つき確率の推定グラフ及びそのノモグラフをいくつか作成している。すなわち、初期値  $X_0$ 、時刻  $t$  における値  $X_t$  の同時確率分布の気候学的経験的分布式 (McAllister (1969) による)

$$P(X_t, X_0) = P(X_t) + [1 - P(X_0)] \exp(-at^b)$$

から出発し、条件つき確率  $P(X_t|X_0)$  の数値計算を

$$a = 0.371\sqrt{1 + (y/0.962)^2} - 0.620[-\ln(-\ln\rho_0)]$$

という仮定 (すでにこの式の由来は別論文で提出済み) 下で行ない、実例として Minneapolis の 1 月最低気温 ( $\rho_0=0.980$ )、Boston Mass. の 1 月、日降水量 ( $\rho_0=0.21$ ) などによく適合することをのべて、こうしたモデル的な条件つき確率計算の有効性を強調した。

O.E. Smith は 2 変数正規分布の  $p.d.f.f(x, y)$  から導びかれる諸分布を利用して風の成分、風の Shear の成分の分布を記述、表現する図式的方法と計算例を報告した。たとえば、風の東西、南北成分をそれぞれ  $x, y$  とし、正規分布に従うとすると  $(x^2 + y^2)^{1/2}$  は風の合力で、 $f(x, y)$  から  $(x^2 + y^2)^{1/2} = R$  の分布は容易に

$$f(R) = \alpha_0 R e^{-\alpha_1 R^2} \left[ I_0(\alpha_2 R^2) I_0(\alpha_3 R) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} I_k(\alpha_2 R^2) \cdot I_{2k}(\alpha_3 R) \cos 2k\phi \right] \quad (R \geq 0)$$

ただし、 $I_0(\ )$ 、 $I_k(\ )$  は Bessel 関数で、たとえば  $\rho=0$  のとき  $\alpha_0 = (\sigma_x \sigma_y)^{-1} \exp\{-\frac{(\bar{x}^2/\sigma_x^2 + \bar{y}^2/\sigma_y^2)}{2}\}$   
 $\alpha_1 = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2)/4\sigma_x^2\sigma_y^2$   
 $\alpha_2 = (\sigma_x^2 - \sigma_y^2)/4\sigma_x^2\sigma_y^2$   
 $\alpha_3 = (\bar{x}/\sigma_x^2)^2 + (\bar{y}/\sigma_y^2)^2)^{1/2}$ ,  $\tan\phi = \bar{y}\sigma_x^2/\bar{x}\sigma_y^2$   
 となり、その他、条件つき確率分布とか、 $R$  の 1~3 次モメントとかをもとめ、Cape Kennedy などにおける風のデータに適用して図的に興味ある結果が得られると述べた。

石原健二は北陸地区の降雪量重回予報方式を確立する

1971年10月

ために、相関解析とその物理的考察について丹念に検討し、有効な力学的予報要因を撰定し、総合して精度のよい予報が出せることをのべ、これまで困難な問題とされてきた雪の短時間予報に明るい見通しができたことを実例で示した。数多くの各地区予報式がよく当るので、要因のえらび方について質問されていた。アメリカのモルスケールの降雨、降雪の統計予報でもこれほど適中した例はないようである。R.G. Miller は自分の非線型回帰方式による確率予報の欠陥 (筆者もこれを指摘した) を修正し、改善する目的で Screening Lattice Algorithm (SLAM) の提案を行なっていたが、当日欠席したので、いささか期待外れであった。

こうした統計技法の効果的利用によって気象統計の内容も豊かになってくることが期待される。

### 9. 総括

以上、国際シンポジウムの個別的発表の要点を網羅的に説明したが、総括的な印象を述べると、次の 2 点があげられよう。

- (1) アメリカの研究者の層が他の諸外国にくらべてずっと厚く、内容的にも相当高度の統計学的知識を気象の問題に応用しようという意欲が盛んである。日本からは気象庁からの参加者が一人もなく一寸淋しかったが、今後もっと積極的な取組みが必要であろう。
- (2) このシンポジウムは 1 人約 30 分の発表時間が与えられ、午後 3 時頃にはその日の分が終了し、討論も自由にできた。われわれもできるだけ多くの人と交流するため、あまり上手でない英語で話し合ったが、非常に楽しく有意義であった。欲をいえばテーマをしばった Panel discussion の機会があればよかったと考えられる。

最後にわれわれ日本人 3 人はハワイ大学 Jones 教授の案内でハワイ大学計算センターを見学し、その Aloha System の内容、APL、TSS の状況を視てきたが、大型計算機を多くの人が共同利用し、1 日 1000 JOB 以上の仕事が効率よく処理されることが分った。私立大学で小型計算機しかない私にとって羨ましい限りであったが、研究水準自体は日本と大差ないと思った。

友好的な雰囲気のもとにすべてが終了し、ここで発表されたものは、Preprint として参加者に配布されたものに収録されているし、いずれ学会誌に公表されよう。以上のべた報告論文についてなお深く知りたい方は御連絡頂きたい。