



気象統計について

小 沢 正*

1. まえがき

気象現象と統計とのかかわりあいはいは古くから気候統計として重視され、また、特に複雑な大気現象を含んだ長期予報の問題や乱流現象などに関連して、スペクトラム解析、時系列解析法などが活用されてきた。数理統計学のぼつ興と共に、その実験計画法（分散分析法）などによる気象現象の解明に関する適用が試みられ、さらに、コンピュータの高性能化、数値予報の進展に伴って近年数理統計学の多変量解析法を用いて、数値予報の種々の output の値をもとに天気に関する諸要素を説明しようとする MOS (Model Output Statistics) とか、deterministic な数値予報に対して統計学の確率分布関数の立場から予報およびその predictability などについて考察しようとする Stochastic Dynamics と呼ばれる研究も進められている。(E.P. Epstein: 1969).

しかし、多変量解析の気象現象における適用や Stochastic Dynamics などの研究に関して、気象現象が物理過程をその根底にしており、それらの解明、予報などに関して統計的処理法を過信して、より基本的な物理過程の考察を軽視することのないように統計的処理法の限界と気象学とのかかわりあいについて十分な考察がなされる必要がある。

さて、コンピュータの大型化、高速化に伴って一般的に数理統計学の広範囲の活用、特にその多変量解析法のあらゆる科学分野、情報、産業分野での応用は目覚ましいものがある。現在活用されている数理統計学の理論的基礎はおおむね1940年代までに構成されたものであり、それらの理論は、日本では戦後一時的には記述（古典）統計学と対比させて推計学と呼んだ時代がある。なぜそのように区別されねばならなかったかを一口で言うと、数理統計学でのたとえば標本分布論で明らかのように、標本（資料）と母集団との対峙が理論的に明確化されたため

である。数理統計学およびその応用の歩みを大づかみに回顧すれば、1920年～1950年頃はおもに理論の展開の時期であり、1960年代はコンピュータの高度化に伴う応用の期間で、日本では1970年代が後者の時期であるようである。したがって、数理統計学の勉強のための基礎的な図書、文献としては、かつてこの講座と同じ趣旨で「天気」に連載された「気象学の手引」の1項目として鈴木：気象統計を理解するために という題目で掲載した参考図書の多くは現在でも良書であると思う。一方、現在の時点は、前述したようにコンピュータを駆使した統計結果に対する批判を明確化し、統計理論の発展、正しい応用面での活用を通じ新たな問題の提起などが必要な時期であると思う。

2. 数理統計学に関する参考書など

近年の高等学校の教科書には行列、ベクトル、確率および統計などの項目について、たとえば標本と母集団、統計的仮設の検定、推定などの概念を理解するための教課が盛り込まれている。

そこで、さらに統計学を勉強したい、また種々な解析資料について統計的処理を実施したい人達の初心者用の統計学の入門書としては、まず **Hoel: Introduction to the mathematical statistics** (浅井, 村上訳：入門数理統計学) を推奨したい。高等学校卒業程度で統計学全般がよくまとめられており、確率、分布関数、重相関、判別関数、検定、推定などの概念を正しく理解する上にきわめてよい初等の教科書である。ただし、同じ著者、訳者、発行所の「初等統計学 (Elementary Statistics)」ではないことに注意していただきたい。大学コースの教科書で数理統計学の基礎的な理論を身につけたい人には、**Wilks: Mathematical Statistics** がよい本である。数理統計学の全般的な基礎理論を理解するのに最良な教科書の一つである。現在では、初版の訳は 小河原訳：数理統計学として出版されているが（一般書店になく出版元にある）、その和訳は原著者も謝辞されているように〔註〕と

* T. Ozawa, 気象研究所予報研究部

して原書の式の証明の補註, 各章について関連した項目の補充などきわめて懇切丁寧である。また, **Simeon: Mathematical Statistics** (河田・川田 訳: 数理統計学) (1971) もあり, 初版の項目より拡充されている。このような教科書を1冊マスターしておけば, あとは他の数理統計学およびその応用に関する数々の図書も平易に要領よく読めるようになるし, また, 実際問題を取り扱うときその問題について詳しく書いてある参考書について関連した項目だけを読めば用がたりのようになる。ただ, 教科書特に専門の気象学に関連した書籍以外の教科書を読むのは根気のいることであり, できれば何人かで一緒に読みたいものである。

確率論では, 初等で基礎的な教科書として 国沢: 近代確率論 は大学初等程度であるが一読を薦めたい。また, 多変量解析についてほとんど触れてないが 河田・国沢: 現代統計学 は上巻に統計学の基礎の項目について記述されており, 特に下巻には線型計画, ゲームの理論, モンテカルロ法などトピックスについて説明している点に特色がある。また, 数理統計学全般(多変量解析を除く)をコンパクトにまとめた 宇野: 数理統計学演習 も便利である。実際の統計的問題を取り扱うとき多変量の解析を必要とする場合が多く, 計算器が幼稚な時代には多変量解析の実用化はきわめて困難であったが, 最近のように電卓を含め計算機の能率化はこれを容易にし, 多変量解析法の応用があるゆる分野で活用されている。多変量解析法の教科書としては, 奥野・久米・芳賀・古沢: 多変量解析法 は著者らが多年多変量解析を実践して来ただけあって, その豊富な経験にもとづくこの著書は名著で実例も多く掲載して説明されている。今すぐ仕事にとりかかりたい人にとっても有効であろう。なお, おもに同じ著者による 統多変量解析法 は, 前著書の補遺と計算プログラムを中心に書かれている。同種類の参考書として 浅野監修 後藤: 多変量データの解析法 は前述の著書よりやや難解であるが, 前述の著書の読了後, 多変量解析法に関してコンパクトにまとめられているという点で付記しておく。最近, 数理統計学の分野の書籍は, 書店にズラッと並列されその選択に全く迷う程であるが, 初等にして基礎的な教科書として上述の図書を掲げたい。

統計的解析法のなかで欠かせない時系列解析の分野では, スペクトル解析法に関して 日野: スペクトル解析法 は, 本誌25巻2号の本棚で丸山が紹介しているようにこの種の基礎的教科書として推したい。また, 同じような

本ではあるが特に豊富な気象資料(境界層, 大気大循環)の解析をまじえて興味深く読める 花房・林: スペクトル解析法 もある。なお, **Jenkins・Watts: Spectral Analysis and Its Applications** も実用的な教科書である。時系列に関連して, 特に気象現象は, 工場の生産工程管理や品質管理の問題のように簡単に実験計画法やその他の統計法を応用できる程単純な過程ではなく, 元来が統計学的に時系列現象で, そのことは物理的には大小規模の現象を包含した, 非線形の運動, 過程に従う現象である。この時系列現象の解析法の実用的で手頃な図書は, 上述のスペクトル解析法以外の分野についての和書はきわめて数少ない。その意味で, 古くは 小沢・藤田: 東北地方の気候変動 は, 1変量ではあるけれども時系列解析法の具体的例示として今なお掲げられる。また, 既に絶版になっているが 小河原: 定常時系列解析 はこれも1変量の時系列解析を取り扱ったものであるが, 前者より一般的に解説され, 具体例も挙げわかりよい。多変量の時系列解析法を取り扱った参考書として, これも古い本ではあるが **Quenouille: The Analysis of multiple Time Series** は, 100頁たらずの図書ではあるが計算例を逐一あげて解説されており実用的な本である。最近ようやく時系列解析の和書も出版されるようになり, たとえば 赤池・中川: ダイナミック・システムの統計的解析と制御 また 藤井: 時系列解析 も出版されており一読を薦めたい。そのようななかで, **Box・Jenkins: Time Series Forecasting and Control** は時系列を勉強したい人にとって比較的わかり易く書かれており推奨したい。なお, 時系列解析も含み数理統計学の全般を網羅し, しかも実用的な参考書・教科書でもある **Kendall: The Advanced Theory of Statistics** は, 3巻にわたり大冊ではあるが初等的に懇切に書かれており数理統計学を実用化する人またはグループにとっても座右に置きたい名著である。

また, 特に気象統計に関しては 鈴木: 気象統計 は, 著者の観点から見た1965年頃までの気象への統計学の応用例および O.R. などを主にして解説している。以上が, 数理統計学をマスターする上にまた実際に応用する上でたくさんある統計学の図書のなかで比較的良好な基礎的な教科書であると思われる。

なお, 著名な数理統計学の著書のはしがきには, 統計的データ解析にはそのデータのもつ内容, 背景とかそのデータが得られたプロセスなどについて実地の固有な知識とデータを計量的に集約, 解析するための数理的な方

法の双方を備えておくことを必ずと言ってよい程強調している。特に、実地の固有な知識すなわちわれわれにとっては気象学とその上に立った経験が貴重なことは当然である。

統計用語集として、数学全般の用語と共に 文部省：数学用語集 があり、気象学編と同様に第1・2部の和英・英和の数学用語と第3部として統計用語が編集されており便利である。また、統計学に関する必要な図表はたいのこの本の巻末、付録として掲載されており実用にはこと欠かないが、絶版となっている 小河原ほか：統計公式および図表とその使い方 は図表と共に簡単な解説があり便利で使い良い。数理統計学全般にわたる図表としては、個人で買うには負担が大きくその必要性も少ないが 日本規格協会：統計数値表 JSA-1972 がある。統計学の辞典として、東洋経済新報社：統計学辞典 およびその改題として 統計学大辞典 もそれぞれ特色があって便利なきがある。

3. 気象統計に関する最近の話題

1960年代の気象統計に関する論文は、主に予報関係について 気象学会編：Selected Meteorological Papers, No. 23, Meteorological Statistics に掲載されている。1970年代に関しては、計算機の高性能化に伴って今まで実用化が困難であった多変量解析法の気象への応用がその特徴と言ってよいのではなからうか。

特に、1950年代の統計的予報の経験と数値予報の精度向上に伴って多変量解析法を応用した、前述の MOS による天気要素の翻訳が試みられている。1975年頃までの MOS に関する総合報告は、小沢：MOS について に解説されている。また、日本における MOS の現状については 昭和51, 52年度全国予報技術検討会資料 に掲載されている。統計の主要な役割は資料の計量的な集約と解析にある。そして、数理統計学の主要な武器である統計的（帰無）仮説の検定、推定論の基礎となっている仮定は、ノンパラメトリックの統計を除いて厳密には（多変数）正規分布と資料の独立性である。気象統計の場合には気象現象は本来は時系列過程であり、また、資料によっては正規分布から偏った場合もかなりある。したがって、厳密には統計的検定・推定が工場の製品管理のように単純ではない。そのために、多変量解析法を適用する場合でもむやみに変数の数を多数とるのではなく、むしろ少ない確実に正規分布に近い変数（あるいは正規化した変数）をとることが自由度の問題と共に必要なことであるし、MOS の検証も資料数を多くとって行

なわれる必要がある。同時に、そのような観点からも MOS 方式に取り入れられた要因について常に総観的考察がなされる必要がある。

最近の気象統計の分野の話題として、MOS の方向と今一つの方向は deterministic な数値予報に対し、確率分布関数の観点から、Initial Pattern の観測、解析などの不確かさからもたらされる誤差が数値予報モデルの非線型項と関連して deterministic の数値予報によるパターンが確率的な見方からするとどのような平均的なパターンとなるであろうかというように、確率的に平均の予報パターンを示そうとする Stochastic Dynamics という研究が進められている。Epstein (1969), Fleming (1971), Pitcher (1977) などの研究である。それらは、順庄、傾庄の数値予報モデルなどについて2重フリーエのような直交関数の展開による各波数の振幅の確率的平均値、波数間の振幅の相関係数、分散、共分散などについて、数値予報と同様に各ステップごとのそれらの外挿値を1週間以上も求める試みである。観測・解析誤差に相当する分散を与えて観測網の疎密の影響、予報およびその Predictability などの検討がなされている。

多変量解析法の気象への適用は、最近日本でも盛んに行なわれており、MOS の他に、たとえば 三上：最近90年間の北半球気温偏差分布の変動 (1978) は、気候の長期変動に関して北半球 500 mb 高度場の成分分析による統計的解析や日本付近の 500 mb 高度分布の分類に関して成分分析やクラスター分析法の適用とか日本の気候区分に関してのクラスター分析法の応用などがなされつななる。

かつて、曲田 (1959, 61) は、統計的予報の研究において力学モデルと統計的予報との相互関連について考察を行なった。すなわち、うず度方程式の各項の間の相関係数を検討し非線型効果が統計予報には寄与していないことを示し、相関場の変動すなわち回帰係数の時間的変動を考慮に入れた統計的予報式を求めるために一般流の変動と相関場の変動との対応を検討した。いわゆる非定常の場合の統計的予報について考察したものである。その頃まで、いや現在でも統計的予報法と力学モデルとの関連を追究したものは少ない。さきに掲げた Stochastic Dynamics はその一つであるけれども、MOS の場合は、当然のことながら時間に関する問題は形式的には入っていないが、気象統計を実施する上で、統計法と力学的・総観的考察との関連についての考察は常に必要なことである

文献

教科書

- Hoel, P.G., 197: Introduction to the mathematical statistics, (浅井 晃・村上 正訳: 入門数理統計学, 404頁, 培風館).
- Wilks, S.S., 1956: Mathematical Statistics, (1st Ed.), 小河原正己訳: 数理統計学, 452頁, 育文社.
- Simeon, M.B., 1971: Mathematical Statistics, 河田龍夫・川田孝行訳: 数理統計学, 363頁.
- 国沢清典, 1975: 近代確率論, 280頁 (第5版), 岩波全書.
- 河田龍夫, 国沢清典, 1956: 現代統計学 (上・下), 川書店.
- 宇野利雄編, 1977: 数理統計学演習(25版), 262頁, 共立全書, 98.
- 奥野忠一, 芳賀敏郎, 久米 均, 吉沢 正, 1977: 多変量解析法, 430頁, 日科技連.
- 奥野忠一ほか, 1977: 統多変量解析法, 299頁, 日科技連.
- 浅野長一郎監修, 後藤昌司, 1973: 多変量データの解析法, 366頁, 科学情報社.
- 日野幹雄, 1977: スペクトル解析, 300頁, 朝倉書店.
- 花房龍男, 林 良一, 1977: スペクトル解析, 気象研究ノート, 131, 74.
- Jenkins, G.M. and Watts, 1968: Spectral Analysis and its Applications, pp. 541, Holden-Day.
- 小河原正己, 1951: 時系列論とその応用, 応用統計学 (日本応用力学会編).
- Quenolle, M.H., 1957: The Analysis of Multiple Time-Series, pp. 104, Griffin's Statistical Monographs.
- 赤池弘次, 中川東一郎, 1977: ダイナミックシステムの統計的解析と制御, 189頁, サイエンス社.
- 藤井光昭, 1978: 時系列解析 (現代数学応用講座), 222頁, コロナ社.
- Box, G.E. P., and G.M. Jenkins, 1976: Time Series Analysis: Forecasting and control, pp. 574, Holden-Day.
- Kendall, M.G., The Advanced Theory of Statistics, 1 (1977, 4th Ed., pp. 472), 2, (1973, 3rd Ed. pp. 723), 3, (1976, 4th Ed. pp. 582).
- 鈴木栄一, 1968: 気象統計学, 新気象学叢書, 314頁, 地人書館.

統計, 図表, その他

- 文部省, 1977: 学術用語集 (数学編), 146頁, 大日本図書.
- 小河原ほか, 1957: 気象学図表および公式, 気象学講座, 19, 117-160 地人書館.
- 山内二郎編, 1972: 統計数値表, JSA-1972, 図表451頁, 解説266頁, 日本規格協会.
- 東洋経済新報社: 統計学辞典 (1956), 1024頁, 統計学大辞典 (1966), 1036頁.

文献

- 小沢 正, 藤田敏夫, 1953: 東北地方の気候変動 (I), 気象集誌.
- 日本気象学会編, 1974: Meteorological Statistics, Selected Meteorological Papers, No. 23.
- 小沢 正, 1977: MOS について, 大気 (気象研究所), 17-18, 4-53.
- Epstein, E.S., 1969: Stochastic Dynamic Prediction, Tellus, 21, 739-759.
- Fleming, R.J., 1971: On Stochastic Dynamic Prediction (I), Mon. Wea. Rev., 99, 851-872.
- Fleming, R.J., 1971: On Stochastic Dynamic Prediction (II), Mon. Wea. Rev., 99, 927-938.
- Pitcher, E.J., 1977: Application of Stochastic Dynamic Prediction to Real Data, J.A.S., 34, 3-21.
- 三上岳彦, 1978: 最近90年間の北半球気温偏差分布の変動, グロスベッター, 16, 12-28.
- Magata, M., 1961 On the Dynamical Consideration of the Correlation Fields at 500 mb Level, J. Met. Soc. Japan, 39, 175-186.
- 曲田光夫, 1959: 相関法による等圧面高度の予報について, 気象と統計, 10, 11-16.