



天 気

1992年12月
Vol. 39, No. 12

[シンポジウム]

301; 503 (統計気候学)

第5回統計気候学国際研究集会の報告*

田 中 博**・北川源四郎***

1. はじめに

上記の研究集会が、1992年6月22日～26日にかけて、カナダのトロントで行われた。会場では、同時に、第12回大気科学におけるAMS確率統計研究集会が並行して開催された。この統計気候学国際研究集会は、Prof. Allan Murphyが率いる研究集会に端を発し、15年前に発足して以降、拡大成長しつつ今日に至っている。1980年に開催された第1回集会では、統計的知識が気候学において本質的に重要であることが認識され、気候とその変化を深く理解するためには、最新の統計的手法の開発と応用が必須であることが主張された。ちなみに、第1回の開催国は日本であり、鈴木栄一氏の活躍が記録に残っている。第2回以降は、リスボン、ウィーン、ロトルア、そして、今回のトロントで開催されている。

企画委員は、時勢に応じたトピックスを適宜に取り込み、最優先テーマを常に明確にして、研究者の裾野の拡大に努めてきた。最近の参加者の分野の広がり、プロシーディングの厚さの変化からも明らかのように、この集会への出席者数は着実に増大している。今回の出席者数は、31の国々から、これまでの最高の238人に達している。その内訳は、USA(103)、カナダ(49)、ドイツ(18)、オランダ(7)、イギリス(7)、中国(6)、……である。日本からは、著者二人が出席した。

オープニングセッションには約200人が出席し、ホスト役のFrancis Zwiers(CCC: Canadian Climate Center)をはじめ、Allan Murphy(OSU: Oregon State University)、Paul Mielke(CSU: Colorado State University)等が、参加者に感謝の言葉を述べた。大会初日の気温は、 10°C 以下の記録的な涼しさであった。カナダは寒い国と思っている大会参加者に対して、通常は $24\sim 27^{\circ}\text{C}$ なのだ、とホスト役の関係者がしきりに言い訳をしていた。

大会三日目にはバンケットが催された。この席で、大気科学への統計学の応用に関する輝かしい業績を讃えて、Glen Brier, Ed Epstein, Lev Gandinの3人が表彰された。この研究集会では、お互いに、あなたは統計屋それとも気候屋ですか、という会話をしばしば聞いた。気候屋が全体の3割程度で、残りの大部分を統計屋が占めているように思えた。

2. 講演内容

研究発表の多くは、第12回確率統計研究集会との合同で行われた。約150件の口頭発表と数件のポスターセッションが行われ、その内容は763ページにわたるプロシーディングにまとめられている。以下に、印象に残った発表をいくつか紹介する。

はじめに、英国ハードレーセンターのC. Follandは、北部インド洋のSST時系列を解析し、1941年に急激な温度上昇が見られる事を示した。しかし、これは、観測手法の欠陥によるものである事を説明し、補正を行った時系列を作成しなおすとともに、1920年頃のインド洋の

* Report of the 5th International Meeting on Statistical Climatology, Tronto, 22-26 June 1992.

** Tanaka, H.L. 筑波大学地球科学系.

*** Kitagawa, G. 統計数理研究所.

SST データには、約 0.5° のバイアスがある、と注意を促した。誤差補正の仕方は、地域にも時間スケールにも依存するので、注意が必要である。彼をはじめ、多くの参加者が、IPCC レポートの1992年版の図を早々と引用しているのが印象的だった。

NCAR の K. Trenberth は CODAS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) データ、CAC (Climate Analysis Center) データ、Jones 等が作成した IPCC 地上データ、および、UKMO (英国気象局) が作成した SST データを用いて、SST および海上気温の S/N 比を検討した。太平洋と大西洋の SST の 1 か月以内の周期の変動幅は、標準偏差にして約 1.2°C と見積もられるのに対し、海上気温のそれは、約 1.5°C とやや大きく、両者の各点での時系列には 0.89 の相関が見られた。もし、全球平均気温に変動があるとすれば、そのシグナルは、僅かの観測点のデータからも検出できるはずである、と主張した。

カナダの B. Goodison (CCC) は、積雪深観測におけるサンプリングの問題を扱った。気温や気圧に比べ、積雪深の分布の空間自己相関は、距離とともに急激に低下する。ランドサットなどの人工衛星観測による解像力は 1 km 程度が限度であり、測候所などによる観測データから、空間自己相関の細部構造を求めるのは困難である。そこで、彼は、広大な農園に目盛りの入ったポールを一列に並べて、集中観測を行った。ところが、農園側は牧草を刈り取る際に、ポールがあるために、その周辺だけ牧草を刈残してしまった。そのため、春になってみると、ポール周辺の背丈の長い牧草の上だけに、30 cm ほどの雪が数珠つなぎになって残っている、と言う奇妙な観測結果を得てしまった。積雪深観測のむずかしさを象徴する例である。

USA の D. Tyler (Rutgers University) は、カテゴリー化された変数のスペクトル解析について述べた。例えば、過去の記録に残る天候について、快晴、晴、曇、雨、といったカテゴリー変数を数量化し、その卓越周期を検討する、という例を考える。このとき、どのように数量化するかによって、スペクトルピークは大きく変化することを彼は示し、この問題をある種の固有値問題に帰着させて、最適数量化を得る新しい手法を紹介した。

北川は、非定常時系列の状態空間モデルと、その気候データへの応用について述べた。状態空間モデルは、気候データなどの非定常時系列の表現に優れているが、その構造は予報モデル、カルマンフィルター、平滑化と密

接な関係にある。これらの関係を、統一的に説明し、平均や分散が時間と共に変化している実際の気候時系列の解析結果について紹介した。

NCAR の Madden は、全球平均気温の予測に関して、気候ノイズの大きさを定量的に検討し、予測限界についてコメントを述べた。タイムスペクトルと周波数応答を用いて定義されるこの気候ノイズは、アラスカ付近で最大の 6°C であり、それ以外の地域では、約 3°C であった。S/N 比の解析により、南北 30° 以内の低緯度が高緯度より予測限界が長く、また7月の方が1月より長いという結果を示した。

田中は、FGGE データの信頼性の一指標として、ECMWF と GFDL が作成した FGGE IIIb オリジナル解析と再解析の4データセットを比較検討した。オリジナル解析で明らかになった重力波成分のエネルギーの過剰 (GFDL) と不足 (ECMWF) のコントラストは、再解析により歩み寄るところか、むしろ広がっていることを述べた。

ポルトガルの J.A.M. Corte-Real (University of Lisbon) は、NMC の 500 mb 高度データをブロックングインデックスにより30年間にわたって分類し、ブロックングに対応する期間の SST や渦度強制のコンポジットを作成した。PNA と逆 PNA パターンが、ブロックングインデックスにより明確に分離し、それが SST のアノマリと良く対応する事から、SST による熱的強制の長周期変動に対する重要性を示した。

ある統計学者は、南極の 850 mb データ (大陸の地下になる) を安易に用いて統計解析を行い、その結果を発表した。すると、すかさず気候学者である Trenberth がそのような外挿データの解析結果に科学的意味はないと厳しいコメントを述べた。統計学と気候学に限らず学問の境界領域では、不慣れたデータを扱う機会が多くなるため、このような問題はつきもので、それを乗り越えてゆく必要がある。

ドイツのマックスプランク研究所からは、J.S. Xu, R. Schnur, G. Buerger, H.v. Storch といったメンバーが、こぞって POP, PIP 解析の結果を紹介した。POP (Principal Oscillation Pattern) 解析と PIP (Principal Interaction Pattern) 解析は、コンプレックス EOF 解析の拡張と考えられ、力学系のノーマルモードをデータ行列から抽出しようとする新しい統計解析法である。名称のごろの良さには脱帽する。ここでは、POP 解析について、そのエッセンスを紹介したい。

自律的線形力学系は、位相空間での状態変数ベクトル $\mathbf{x}(t)$ 、システム行列 \mathbf{B} と強制項 $\mathbf{n}(t)$ を用いて、次のように表現できる。

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{B}\mathbf{x}(t) + \mathbf{n}(t)$$

非線形システムでも、時には線形項が卓越し、カオス的振舞いの中から明瞭な振動現象が出現することがある。この線形システムの出力を、 Δt の時間間隔でサンプリングすると、近似的に次の発展方程式を導くことができる。

$$\mathbf{x}(t + \Delta t) = \mathbf{B}'\mathbf{x}(t) + \mathbf{n}'(t)$$

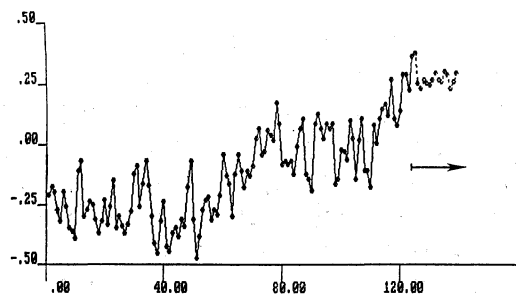
ここで、 \mathbf{B}' の固有値は \mathbf{B} のそれから既知量だけシフトしている。次に、大胆な仮定ではあるが、 $\mathbf{n}'(t)$ は極めてランダムな強制であり、 $\mathbf{x}(t)$ と $\mathbf{n}'(t)$ の間に相関がないとすると、ラグ相関行列を計算することにより、次の関係式を得る。

$$\mathbf{B}' = E[\mathbf{x}(t + \Delta t)\mathbf{x}^T(t)](E[\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^T(t)])^{-1}$$

ここで、 E は期待値、 $\mathbf{x}^T(t)$ は $\mathbf{x}(t)$ の転置を意味する。観測に基づくラグ相関行列から \mathbf{B}' を計算し、その固有値問題を解く事により、線形システムのノーマルモードが得られる。

Schnur は、00 Z, 12 Z ($\Delta t=12$ 時間) の ECMWF のデータを用いて、中緯度傾圧不安定擾乱の POP 解析を行った。卓越する POP モードとして、これまでに傾圧不安定の理論的研究で明らかになっている Charney モードや、Dipole-Charney モードの構造を見事に抽出してみた。ここでは、POP 解析が既存の理論を裏付ける結果になっているが、続く Xu は、この POP 解析を月平均データ ($\Delta t=1$ か月) に適用し、未だに理論の確定しない、大気海洋結合システムの長周期変動に対する卓越 POP モードの構造を紹介した。同様に Storch は、Madden-Julian 振動の POP 解析を行った。これらの研究は、赤道付近や中緯度に見られる季節内振動や、エルニーニョ等の力学システムの解明に役立つ事が期待される。POP 解析は、まさに線形力学と統計学の接点であり、興味深いと同時に、今後広く普及する可能性がある。

最後に、気候変動の問題に統計的予報モデルを応用した例を紹介したい。USA の H.L. Gray (Southern Methodist University) は、全球平均気温の経年変化を示す IPCC タイムシリーズと Hansen and Lebedeff タイムシリーズを用いて、自己回帰移動平均 (ARMA) モデルをつくり、実際に将来予測を行ってみた。さらに、ARMA (アーマと読む) モデルの自己相関をゆっ



第1図 全球平均気温の経年変化 (IPCC タイムシリーズ, 1861-1989) と、GARMA モデルによる将来予測 (H.L. Gray による)。矢印の部分が、十数年先の統計的将来予測を示す。

くり減衰させることにより、より長期間のメモリーを保持させた GARMA (ガーマと読む) モデルを開発し、統計的気候予測を行った (第1図参照)。彼は、GARMA モデルを上記の2種類の時系列に5%以下の誤差でフィットさせることができた。従って、これは統計的に充分に有意なモデルである。

3. おわりに

近年の地球環境問題に対し、統計学の専門家も負けたいられない。大気大循環モデルにおける微分を差分に置き換えて、変数を統一し、全球平均量に着目することにより、力学的大循環モデルを統計的自己回帰モデルに帰着させることは、可能であろう。あとは、非線形項等からなる残差項の非定常性や自己相関、等方性、一様性等の統計的性質が研究対象になる。これは、力学系で乱流統計量をあらかじめパラメタライズして、モデルに組み込むことと同等である。

大循環モデルがますます複雑さを極める中で、モデル大気の定常性、エルゴード性等の統計的性質が、現実大気のそれを正しく評価しているという保証はない。長期予報において、大気大循環モデルを用いた決定論的将来予測は、カオスの前に暗礁に乗り上げている。気候予測においては、大気の本質的特性が自動的 (intransitive) か他動的 (transitive) か、という問題が、未だに未解決のままである。もしそれが自動的であるなら、気候予測に対してもカオスの壁が再び立ちはたかることになる。気候モデルによる予測は、初期値問題ではなく、CO₂ の増加に対する境界値問題である、との解説をしばしば聞くが、これは大気が平衡状態を持ち、他動的で

あることを暗に仮定している。統計学で言えば、これは解の定常性を仮定する事に相当する。

力学的気候モデルが、物理法則に基づいて各格子点での加速度計算を何億回と繰り返すのに対し、統計的気候モデルは、現実大気の長年の経歴から変動の本質を探り出す事により、予測を行う。前者がスーパーコンピュータの最前線で駆使されるのに対し、後者はパーソナルコンピュータでもそれなりの予測を提供するのは、対照的である。気候予測は大気力学モデルで行うのが常識、といった固定観念がまかりとおっている昨今、統計学者サイドからブレインストーミングな将来予測法が出現することは、おおいに考えられることである。

研究集会後には、ナイアガラツアーが企画されていた。ヨーロッパからの参加者が多かった。トロントには、世界でもっとも高い CN タワー (555 m) がある。これは、筑波にある 200 m 気象観測塔の 2 倍以上の高さである。このスペースデッキ (443 m) から望むトロントの町は、美しく広大で、地平線付近の一面の灯りがシンチレーションのために一斉にゆれていた。眼下を見おろすと、まるで熱気球に乗っているときのように、足元がふるえてしまった。群立するカラフルなトロントの高層ビルは、人間の歴史と文明の偉大さを感じさせ、個人を畏縮させる迫力がある。とても有意義なトロントでの研究集会であった。

今年お世話になったレフェリーの方々 (1992年)

五十嵐康人	石原 正仁	上窪 哲朗	上田 博	土器屋由紀子	内藤 成規	中田 隆一	西本 洋相
岡本 雅典	小倉 義光	尾崎 友亮	乙部 弘隆	新田 勅	二宮 洸三	野田 彰	萩野谷成徳
加藤内蔵進	蒲生 稔	木村富士男	隅 健一	花輪 公雄	早坂 忠裕	檜尾 守昭	廣岡 俊彦
郷田 治稔	児玉 安正	近藤 純正	迫田 優一	藤部 文昭	藤吉 康志	堀口 光章	松田 佳久
佐藤 純次	沢井 哲滋	鈴木 栄一	高野 清治	三上 岳彦	水野 量	宮田 賢二	村松 久史
高橋 劭	武田 喬男	田中 博	谷 誠	谷貝 勇	吉崎 正憲	米谷 恒春	劉 堯華
堤 之智	坪木 和久	露木 義	鶴田 治雄				(敬称略)