

気 候 ジ ャ ン プ

山元龍三郎・岩嶋 樹也
サンガN.K.・星合 誠

CLIMATIC JUMP

By Ryo zaburo YAMAMOTO, Tatsuya IWASHIMA,
SANGA Ngoie Kazadi and Makoto HOSHIAI

Synopsis

A new concept *Climatic Jump* is proposed for an abrupt change of time average of climatic elements over a few decades, basing upon Lorenz's non-deterministic theory of climate and Iwashima's findings of possibility of multiple stable solutions in a numerical model of the atmospheric general circulation. A simple method of detecting the Jump is proposed, taking account of statistical ambiguity in time mean. Applying this method to the climatic records over Japan, Climatic Jumps are detected for sea-level pressure, precipitation, sunshine duration and maximum depth of snowcover around 1950, as well as the surface air temperature. Occurrence of some abrupt change in the atmospheric general circulation is suggested by the fact that almost simultaneous appearance of jumps could be detected commonly for all the climatic elements taken here.

1. 緒 言

気候は高度の非線型過程であって、線型理論では理解し難い特性を有しているものと考えられる。通常、気候は天気の時間的平均状態と定義されているが、天気を支配する外的要因が同一であっても、必ずしも同一の気候が出現するとは限らない事を、1968年に Lorenz¹⁾ が注目した。この Lorenz の非決定論的気候変動論は多くの研究者の注目を浴び、Lorenz 自身も度々その意義を解説しているが (Lorenz^{2), 3)}、筆者の知る限りでは、この議論の発展は見られない。大気大循環の時間的一空間的スペクトルモデルを作って、季節的に変化する強制作用の下での大気の振る舞いを研究した Iwashima ら⁴⁾ は、外部条件や境界条件が同じであっても、安定な複数の解が存在する場合がある事を示した。この Iwashima らの研究成果は、Lorenz の提唱する非決定論的気候変動論を支持するものであり、Lorenz の非決定論的気候変動論の見地からの気候変動の研究の必要性を強調するものである。

Lorenz²⁾ が気候変動に関連して特に強調しているのは準自律性 (Almost-Intransitivity) におけるリジームの遷移 (Regime Transition) であって、これが実際の気候データの上に現れるとすると、年々変化に現れるだろうと示唆している。今までの気候変動の実態の研究は、変化の連続性を前提として行われてきた。それに対して、筆者 (Yamamoto, *et al.*^{5), 6)} は時間平均の唐突な変化が実際に出現している事を確かめ、これを「気候ジャンプ」と呼ぶ事を提案した。「気候ジャンプ」は、全く新しい概念であり、この論文では今までに得られた結果と残された問題について述べる事とする。

2. Lorenz の非決定論的気候変動論

Lorenz²⁾ は、回転水槽実験の結果と比較的単純な大気の数値モデルの振る舞いに関する研究に基づいて、非決定論的気候変動論を提唱した。その概要を以下に述べる事とする。大気を支配する物理法則に基づいて気候を議論する事は、大気の支配方程式の解の長期間にわたる統計を求める事に他ならない。支配方程式が線型であれば、多くの場合、長期間の統計の唯一性を解析的に示す事が出来る。然し大気の支配方程式は非線型であって、非線型方程式系では長期間の統計の唯一性は保証されていない。

決定論的な形で定式化されている支配方程式系においては、一定の初期条件を与えると、無限の将来までの時間発展の解を得る事が原理的には可能であり、従って無限に長い期間の統計を求める事も原理的に可能である。その統計が初期条件の選び方に独立かどうかが問題である。無限に長い期間の統計が初期条件の選び方に独立である場合を他律的 (Transitive) と呼ぶ。無作為に選ばれた初期条件に対して、無限に長い期間の統計が、ゼロでない確率で、2 種類またはそれ以上も存在する場合を自律的 (Intransitive) と呼ぶ。数学的には、自律的な系と他律的な系の存在が示されているが、任意の方程式系がいつれであるかを直接判断する方法は未だ見つかっていない。

一定に保った或る外的条件の下での回転水槽実験において、一度波数 4 のパターンが起こるとそれが永続するが、もし波数 5 が起こればこれも永続する場合がある。そして、棒で攪拌すると波数が 4 から 5 に変わり、以後何らの刺激を与えなければ波数 5 が永続する。これが、自律性の例である。回転速度を少し変えるなどして、外的条件を僅かに変化させると、攪拌しても波数が変わらないようになり、これが他律性の例である。上では他律性・自律性を無限に長い期間について定義したが、気候を有限時間の統計だと定義した方が実際のである。無限に長い期間の統計が初期条件に独立であるという意味では他律的であるが、その無限期間に含まれる有限期間内の統計が初期条件に依存する場合がある。すなわち相続く有限期間の統計量が明らかに異なる場合であって、これを準自律性 (Almost Intransitivity) と呼ぶ。

回転水槽実験や大気をシミュレートする単純な数値モデルで、外的条件またはパラメータを適当に変えると、準自律性が出現する。数値モデルが複雑になるとこの準自律性は発現し易くなると考えられる。

Lorenz²⁾ は準自律性の例を極く簡単な次の方程式で示している。

$$X_{n+1} = a(3X_n - 4X_n^2) \quad (n=1, 2, \dots) \quad (1)$$

この式は、大気や海洋を含む気候システムの支配方程式を単純化して得たものではない。大気の支配方程式の非線型項は標準的な微差スキームによって比較的低次の多項式になる。それ故、上の式は自律性や他律性の数値的な側面を例示するのに役立つであろう。係数 a が $0 < a \leq 1$ 、かつ、 $n=0$ の値即ち初期値の絶対値が $|X_0| \leq a$ の時、 $-a \leq X_n \leq a$ が示される。

$a^2 < 3/4$ の時、 X_{n+1} と X_n とは同じ符号を持つ。従って、 X_n は X_0 と同じ符号を持つので、それらの平均も X_0 と同じ符号である。すなわち、 a の値 (外部条件) が同じであっても、 X_0 (初期条件) の符号が変われば、平均値の符号も変わる。この場合は、明らかに自律的である。

この場合、 a^2 の多くの値に対して他律的である。 a^2 の値が僅かに $3/4$ より大きい時、 X_n の値が $1/2$ に近い値を持つ範囲は極めて狭い。それ故、任意の系列の任意のメンバーが、この範囲内の値を持つ確率は小さい。かくして、このような場合、相続くメンバーは大抵同じ符号であって、符号が変わるのは極く稀である。すなわち、短期間では同符号であるが、離れた期間については符号が変わる事がある。このような系が準自律的である。

(1) 式のこのような準自律性の数値的な例を Lorenz²⁾ が示している。 $a=7/8$ とおくと、 a^2 は $3/4$ より僅かに大きい。(1) 式は実際の気候の支配方程式から導いたものではないが、かなり類似した特性をもっている。この式は定常解を持っていて、それは $X_n=0$ または、 $X_n=13/28$ である。これらの解は、小擾乱に対して不安定である。また、(1) 式は“2 日の周期”の周期解を持っている。初期値 X_0 がそれぞれ 0.0999,

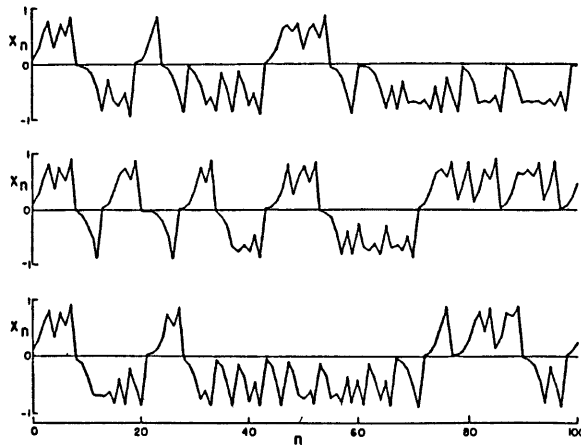


Fig. 1 Solutions of equation (1) for 100 time steps, starting from initial values of 0.0999 (upper), 0.1000 (middle), and 0.1001 (lower). The straight-line segments joining consecutive points are solely for the purpose of making the chronological order easier to see (re-produced from Lorenz²⁾).

0.1000 および 0.1001 に対する解を Fig. 1 に示す。準自律性におけるレジームの遷移が明らかに示されている。初期値 X_0 の値が、僅か 0.1% だけ異なる場合の X_n の値が、 $n=7$ 付近までは互に近い値であるが、 $n>7$ では顕著な差異が認められる。これは予測可能性の限界を例示するものである。実際の大気では、外的要因として、熱的強制の季節変化が強力に作用している。大規模な委節的強制のある場合の簡単な数値実験の結果 (Kraus and Lorenz⁷⁾) を参考にとすると、大気が冬の 2 つのレジームを持っているとした場合、一冬の間に或るレジームから他のレジームに遷移する事はないと考えられる。冬から春を経て夏になり再び冬を迎える時、何れのレジームになるかは多少とも偶然である。すなわち、準自律性は一つの季節の間の持続性を示すが、年々の間の持続性を保証しない。

Lorenz の非決定論的気候変動論の結論は、i) 気候変動の原因は必ずしも外的要因の変化のみではない。ii) 外的要因による気候変動が、準自律性による変化で相殺される可能性がある。iii) 現在、気候変動が決定論的なものではないと断定出来る段階ではないが、今後の研究が望まれる。

3. 大気大循環の数値モデルにおける安定解の多重性

Iwashima ら⁴⁾は、周期的に時間(季節)変化をする外部強制力の影響を受ける時、大気大循環の数値モデルが安定多重解を持つ事を示した。そして、外部強制力の大きさが異なると、安定解の変わる事を見出した。この結果は、気候ジャンプの発現の可能性を与える。すなわち、例えば、火山爆発による成層圏エアロゾルの増加などの為に外部強制力が変化する場合、複数の安定解の中の 1 つまたはそれ以上の解が消滅して、安定多重解の数が減少する。或いは初期状態から出発して消滅するような安定解が実現していた場合、外部強制力の変化に伴って他の解にジャンプする事になる。

今までの気象学で採用されている大気大循環モデルは元来、数値予報を目的として発展してきたものであり、大気状態の時間的経過に対応して支配方程式を時間積分するという方式がとられている。Iwashima ら⁴⁾

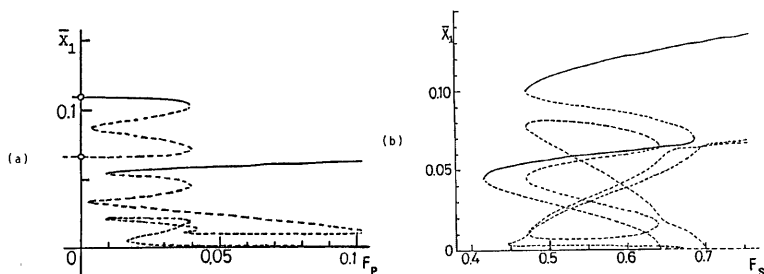


Fig. 2 Solutions of time-space spectral low-order model of the atmospheric general circulation. (a) Solution diagram of steady zonal component $\bar{X}_1$ depending on the periodic forcing F_p . (b) Solution diagram of steady zonal component $\bar{X}_1$ on the steady forcing F_s (reproduced from Iwashima *et al.*⁽⁴⁾).

の用いた大気大循環数値モデルは、今までの数値モデルとは異なり、時間的にもスペクトル展開する方式を採用した全く新しい時間-空間スペクトルモデルである。それは、大気大循環を駆動する渦度（あるいは熱的）強制を表現する項とエネルギー消散を示す項を含む順圧渦度方程式の低次のスペクトルモデルである。得られた結果の一部を以下に概説する。

季節に無関係に作用する定常外部強制力 (F_s) や他のパラメータを固定した時、季節的に変化する変動外部強制力 (F_p) の大きさによる解の東西平均場成分の大きさの変化を、Fig. 2a に示す。この解の分布は、縦軸および横軸に関して左右・上下対称であるので、第1象限のみを示していて、実線と破線はそれぞれ数学的に安定な解と不安定な解である。変動外力の大きさに応じて安定解の数が異なり、 $0.01 \leq F_p \leq 0.04$ では3組の解が存在し、 $0.00 \leq F_p \leq 0.01$ けおよび $0.04 \leq F_p$ では2組の解がある。Fig. 2b は、変動外部強制力 F_p を固定した時、定常外部強制力 F_s の大きさに対する解の東西平均場成分の大きさの変化を示している。この場合には、安定多重解が存在し、 $0.42 \leq F_s \leq 0.47$ で2組の安定解、 $0.47 \leq F_s \leq 0.69$ で3組、それ以外では1組が見出される。このように、定常外部強制力および変動外部強制力の大きさが適当な範囲内にある場合には、複数の安定解が存在する。

上記の結果は、現実の大気と比べると単純な数値モデルにより得られたものであるので、この結果を直ちに、現実の大気に適用する事は無理である。しかし、このモデルは、現実の大気において重要な役割を演じている非線型過程を含んだものであるため、安定解の多重性が現実の大気においても存在する事を示しているものと考えられる。そして、解のジャンプの発現の可能性を示唆している。

Fig. 2a において、変動外部強制力 F_p の値が0.01より若干大きく、東西平均成分の値が約0.06であったとする。その時、何らかの外部要因の変化が生じて、定常外部強制力の大きさは一定のままだが、変動外部強制力の大きさが極く僅かに変化して0.01よりも小さくなったとする。この場合、安定な東西平均場成分は旧の値の近傍では存在しないので、約0.11または0.00の値に唐突に変わる。すなわち、変動外部強制力の極く僅かな変化が大気状態の著しい唐突な変化、気候ジャンプをもたらす事となる。外部強制力の卓越周期は12カ月であるので、気候ジャンプが起こるとすれば、年々変化に現われるものと考えられる。

4. 気候ジャンプの発現に関する予備的考察

準自律性におけるリズムの遷移が起こるとすれば年々変化に見られるだろうという Lorenz^{(1), (2), (3)} の示唆、及び Iwashima⁽⁴⁾ の数値モデルによる安定解の多重性に関する研究結果に基づいて、今までに発表された年々変化を示す観測データの解析結果を検討した。Fig. 1 に示された特徴を参考に、著しい年々変化を

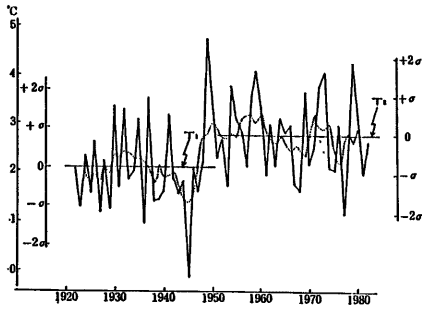


Fig. 3 Winter Surface air temperature anomaly from 80 year mean, averaged over 23 stations of Japan (reproduced from Japan Meteorological Agency⁸⁾). σ signifies the standard deviation.

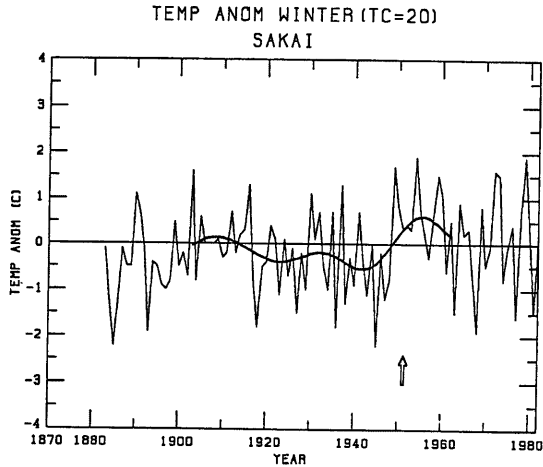


Fig. 4 Surface air temperature anomaly of winter from 80 year mean at Sakai Minato ($35^{\circ}33'N$, $133^{\circ}14'E$), a small fishing port, where no appreciable urbanization effects is considered. Low-pass filtered anomaly with cut-off period of 20 years is given by thick line.

平滑化した数年乃至数十年間の時間平均値の唐突な変化に注目して、『気候ジャンプ』と呼ぶ事とする。そのような立場で、今までに発表されている気候データの解析結果を検討した。特に、1984年に気象庁が刊行した『異常気象レポート』(象気庁⁸⁾)にはかなり膨大な資料解析結果が集録されているので、『気候ジャンプ』が認められるかどうかを調べる事とした。

この『異常気象レポート』に1922年から1980年の間の日本の23箇所の冬の気温の年々変化が示されていて、1951年の前の30年間の平均気温は、1951年から1980年までの30年間の平均に比較すると、約 $0.67^{\circ}C$ 上昇している事が述べられている (Fig. 3)。この記述には、30年平均値の統計誤差についての記述がない。それ故、30年平均値の信頼限界を算定して、時間平均値の不連続的变化が偶然に現れたものではなく有意なものである事を確かめる必要があり、そのような有意性の検定は後で行う。しかし、Fig. 3 に示された時系列の推移

から、この30年平均値の唐突な変化が統計的サンプリング誤差のために偶然に起こったものではなく、実際の現象として起こったのだと予想され、この論文で対象としている気候ジャンプである可能性がある。

この気温の唐突な変化が起こったのは、第2次世界大戦の終わって間もない時期であり、丁度、都市化が顕著に現れ始めた頃である。それ故、ここで注目している気温の時間平均の急上昇が都市化の結果ではないかとの疑問が起こる。Fig. 4 は、都市化による気温上昇が考えられない鳥取県の境港における気温偏差の推移を示したものである。ここでも、注目している気温の時間平均の急上昇が明らかに認められるので、問題の時間平均気温の唐突な上昇を都市化の結果だと考える事は出来ない。

Fig. 5 は、Kelly *et al.*⁹⁾ から再録したもので、1881年から1980年までの北極地方の地域平均気温の偏差の推移を示している。冬の場合に1940年代の末を境にして、20〜30年平均値が唐突に約1°C低下している事に気がつく (Yamamoto ら⁹⁾)。日本での30年平均値が1950年頃を境に上昇しているのに対して、北極地方の変化は逆に低下している。

準自律性におけるリジムの遷移は大循環の変化を意味し、必ずしも全地球的に全て同じ向きに気候が変化する事を意味していないので、地域によって変化が殆ど認められない地域がある事は予期される事である。

米本土の気候変動の実態を研究した Diaz & Quay'e¹⁰⁾ は、1921年頃と1950年頃に比較的唐突な変化が起こっている事に注目し、1921年以前、1921年〜1954年、及び1954年以後の3時期に分けて議論している。そして、それらの3時期の間の変化の地理的分布を与えている。それを再録したのが Fig. 6 であって、1954年頃を境にした20〜30年平均気温の変化が、米国の東記と西部との間で逆である事が明らかに示されている。Fig. 7 は、筆者ら¹¹⁾ が北半球平均気温の推移を求める際に計算した格子点での気温偏差の推移を例示したものである。60°W の子午線に沿う 70°, 60°, 50° および 40°N の4格子点での100年間の時系列である。1950年頃に、70° および 60°N において時間平均値が唐突に低下している事、また、50° および 40°N において昇温している事が認められる。このような事実は、1950年頃の日本で認められた気温(上昇)ジャンプは日本の地域に局限されたものではなく、変化の符号は異なる場合もあるが、全地球的な現象の現れであって、大気循環の唐突な変化に伴う一連の現象であろう事を示唆している。それ故、時間平均値の唐突な変化の定量的な解析、すなわち、統計的に有意な気候ジャンプの検出を試みる事は有意義であろう。

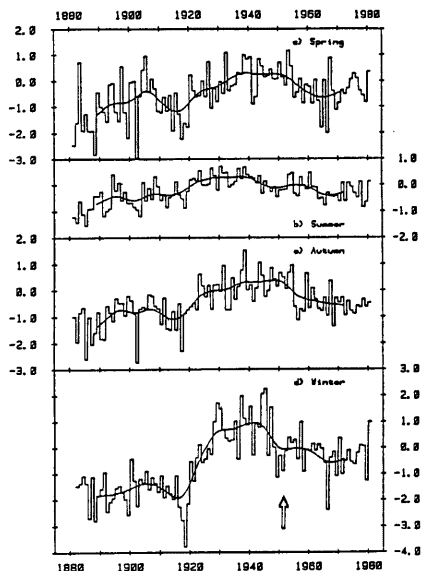


Fig. 5 Surface air temperature anomaly of winter of the Arctic region (reproduced from Kelly *et al.*⁹⁾).

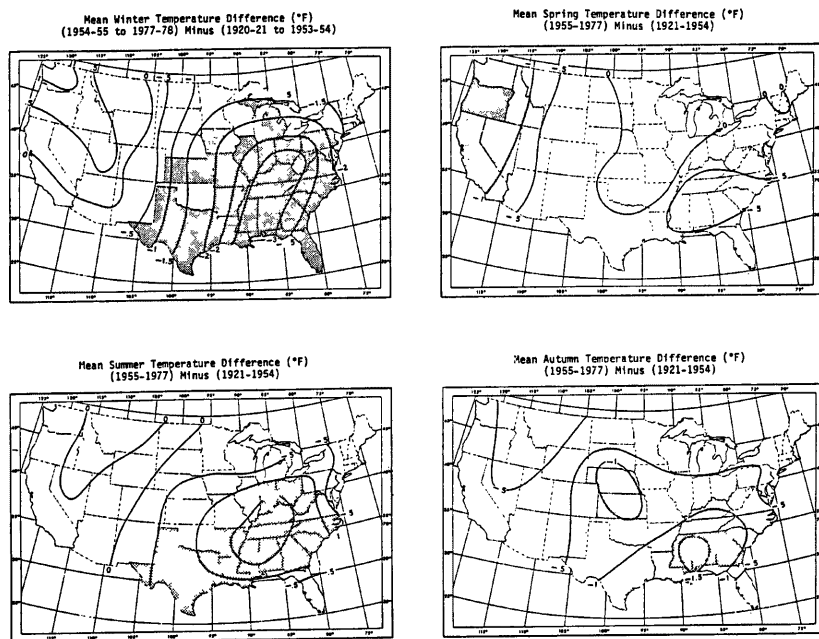


Fig. 6 Geographical distribution of the difference of surface air temperature between the mean from early 1920's to early 1950's and that from later 1950's to middle 1970's (reproduced from Diaz and Quayle⁽¹⁰⁾).

5. 気候ジャンプの解析方法

或る年を境にして、それ以前の10年またはそれ以上の期間にわたる時間平均値が、それ以後の時間平均値と比較して統計的に有意な差異を示す場合を、「気候ジャンプ」と呼んで、ここでの研究の対象とする。観測データの時系列から「気候ジャンプ」を定量的に検出するために、Karl *et al.*⁽¹²⁾ の non-overlapping consecutive epoch analysis に類似の次の方法を採用する事とする：

- (1) 或る年から遡る10年またはそれ以上の期間 R_b (以下、平均期間(前)と呼ぶ) について時間平均値 Y_b とその $p\%$ の信頼限界 δ_{bp} を計算する。
- (2) 同じ年の後の10年またはそれ以上の期間 R_a (以下、平均期間(後)と呼ぶ) について、時間平均値 Y_a とその $p\%$ の信頼限界 δ_{ap} を計算する。
- (3) S/N 比 (シグナル・ノイズ比) を、 $|Y_a - Y_b| / (\delta_{ap} + \delta_{bp})$ により、定義する。
- (4) 注目する年を次々にずらして、S/N 比を計算して、これらの時系列を求める。
- (5) S/N 比が1.0 よりも大きい場合、『ジャンプ』が検出されたとする。
- (6) 平均期間 (前) R_b および (後) R_a については、複数の値を採用するが必ずしも同じだとはしない。 R_b と R_a の種々の組み合わせにおいて、1.0 よりも大きい S/N 比の最大値の発現時を『ジャンプ』の発現とする。

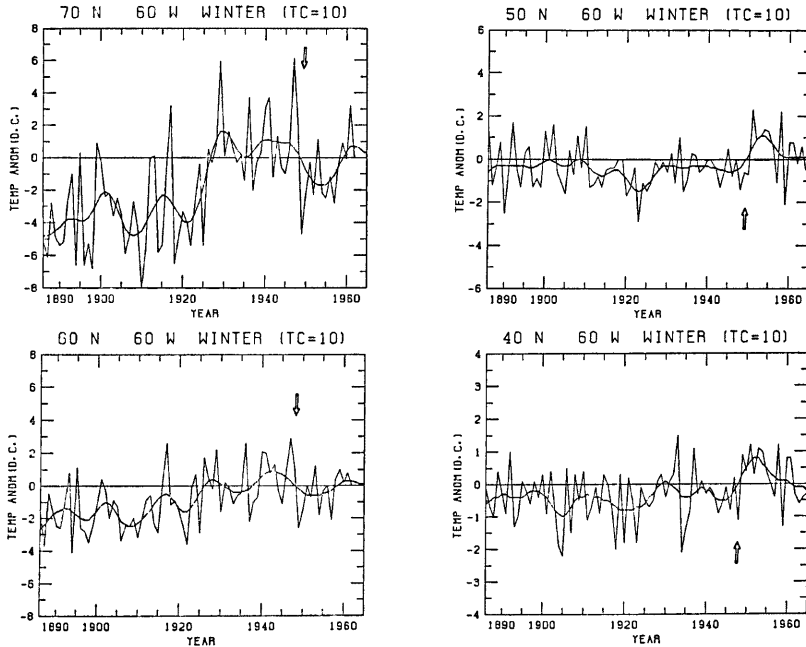


Fig. 7 Surface air temperature anomaly at some grid points along 60°W (reproduced from Yamamoto *et al.*¹¹⁾). Low-pass filtered anomaly with cutoff period of 10 years is given by smooth curve, and arrow indicates abrupt change of time mean like the jump.

(7) R_b と R_a の全ての組み合わせについて、すべての S/N 比が 1.0 より小さい場合には、『ジャンプ』は発現しなかったと判断する。

ここで、どの位の年数の平均期間 R_b および R_a を採用すべきかの判断基準は確定していないので、当面は複数の期間を取り上げる事としている。そして、Karl *et al.*¹²⁾ の結果を参考にして、10, 15, 20, 25 および 30 年を採用した。ジャンプの特性が明らかになれば、この平均期間に関する基準を設定出来るだろう。

上述のジャンプの検出法を夏の降水量について適用した例を Fig. 8 に示す。取り上げた時系列データが (a) に示されている。25年の平均期間(前)と25年の平均期間(後)に対する S/N 比(実線)および前後の平均値の差(破線)の時系列が、Fig. 8(b) に示されている。S/N 比は、1946年から1949年の間で 1.0 よりも大きい値であって、1947年に 1.2 の極大値を持っている。同じ1947年に、平均値の差の絶対値は約 90 mm の極大を持っている。Fig. 8(a) の降水量偏差の時系列において、その長期傾向が1944年～1952年の間で、唐突な変化をしている事が窺えるので、1948年の頃にジャンプが発現したとする事は自然である。この例が示すように、上のジャンプの検出法は充分にその機能を果たすものと考えて良い。この方法では、ジャンプの発現の時期を特定の年として決定されるが、顕著な年々変動の為に、その時期を 1 年単位で確定する事は無意味であって、数年の幅の曖昧さは不可避である事に留意すべきである。

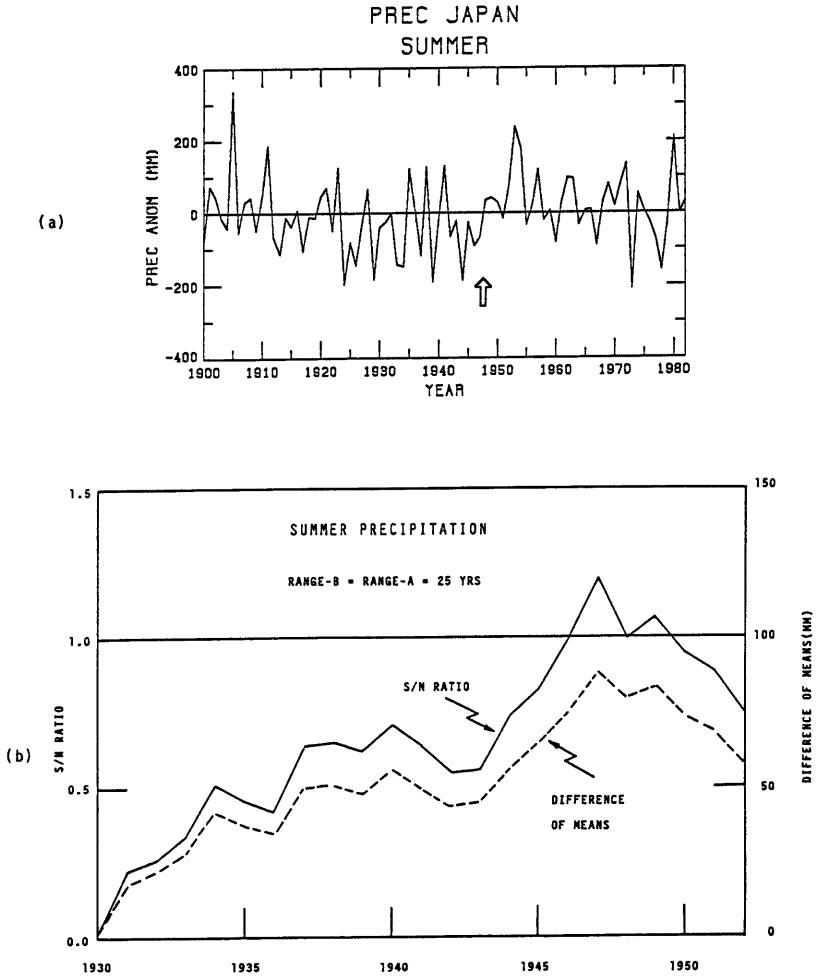


Fig. 8 An example of detecting the climatic jump for summer precipitation averaged over Japan. The time series of the precipitation anomaly from 80-year mean is shown in (a), and S/N ratio and the difference of 25 year means by solid and broken lines in (b), respectively.

6. 気候ジャンプの検出のための観測データ

気象観測データの解析により、大気現象の特性を量的に把握しようとする場合、一般に、データに含まれる誤差についての情報を得ておく必要がある。なお、大規模現象を対象とする時には、局地的不規則性ないしは小規模現象は誤差となるので、その寄与を把握しておく必要がある。このような局地的不規則性を含む観測誤差の統計的算定法として Gandin¹³⁾ の方法がある (Yamamoto¹⁴⁾)。

n 個所の観測所からなる観測網において、 i 地点及び j 地点での観測データを、それぞれ x_i, x_j とする。それらのデータに含まれる大規模現象に対応した値をそれぞれ X_i, X_j とし、局所的不規則性を含む観測誤差をそれぞれ $\varepsilon_i, \varepsilon_j$ とする：

$$x_i = X_i + \varepsilon_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

i 地点と j 地点との間の構造関数を B_{ij} とすると、

$$\begin{aligned} B_{ij} &= (x_i - x_j)^2 \\ &= (X_i - X_j)^2 + \varepsilon_i^2 + \varepsilon_j^2 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \overline{X_i \varepsilon_i} &= \overline{X_j \varepsilon_j} = 0 \quad (i, j=1, 2, \dots, n) \\ \varepsilon_i \varepsilon_j &= \delta_{ij} \varepsilon^2 \end{aligned}$$

を仮定している。—は時間平均を意味し、 δ_{ij} は Kronecker の delta であり、 ε はこの観測網における観測誤差 (局地的不規則性を含む) の平均値である。構造関数 B_{ij} は、統計的に i 地点と j 地点との間の距離の関数だと近似的に考えられる。観測データから求めた構造関数を距離に対してプロットし、距離がゼロになる場合の構造関数の値 B_0 を外挿によって求める。距離ゼロでは (3) 式の第 1 項が消えるので、

$$B_0 = 2\varepsilon^2 \quad (4)$$

(4) 式に基づいて、観測データから局地的不規則性を含む観測誤差 ε を算定出来る。然し、実際には B_{ij} のデータのばらつきがかなり大きいので、精密な算定は困難である。特に冬の降水量のように、太平洋側と日本海側とで顕著な系統的な差異のある場合には、太平洋側の観測点のみの組み合わせから求めた場合に比べて、太平洋側と日本海側と両方の観測点を組み合わせた時には ε の算定値は大きくなる。このような値は ε の上限と考えられる。Table 1 は気温、海面気圧、降水量、日照時間、最深積雪量の 3 カ月の値に対する ε の上限を示している。

これらの誤差の値はかなり大きいので、ここで問題にしているジャンプの検出を単独の観測点のデータについて行う時、ジャンプが誤差に隠れて仕舞う懸念がある。それ故、空間平均値を取り上げる事とする。空間平均値における誤差の寄与は、空間平均値を求めるのに用いた観測点の数の平方根に逆比例すると仮定してよいので、ジャンプの検出が容易になると期待される。わが国の北海道・本州・中国・九州を北部・東部および西部の 3 地域に分けて予備的にジャンプの検出を試みたが、米国本土において、Diaz and Quayle¹⁶⁾

Table 1 The upper bound of observational errors including local irregularities in 3-month mean.

Climatic Element	Observational Error
3-month mean surface air temp	1.0°C
3-month mean sea level pressure	1.2 mb
3-month precipitation	90 mm
3-month sunshine duration	70 hrs
3-month mean maximum depth of snowcoverage	12 cm

7. 気候ジャンプの検出結果

Table 2 は、1930年～1952年の間に検出されたジャンプと、その発現年・S/N 比・ジャンプの大きさ（+ は増加，- は減少を意味する）・平均期間（前）および平均期間（後）を示している，第 5 章の最後の所で述べたように，ジャンプの発現は，1 年単位で指示しても無意味であり，数年の幅でしか意味がないので，1947年～1952年のジャンプは同じで時期の現象と考えてよい。

		Air temperature	Sea level pressure	Precipitation	Sun-shine duration		Maximum depth of snowcover
Number of stations for mean		60	56	60	49		9
Winter	Year	1948			1938	1949	1948
	S/N	1.55			1.64	1.09	1.33
	Jump	+1.0°C	—	—	+43 hr	—34 hr	—14 cm
	Range-B	30 yr			30 yr	10 yr	30 yr
	Range-A	25 yr			10 yr	10 yr	10 yr
Spring	Year	1950		1950	1930	1950	
	S/N	2.04		1.62	1.26	1.26	
	Jump	+0.8°C	—	+65 mm	+42 hr	—36 hr	
	Range-B	30 yr		25 yr	30 yr	25 yr	
	Range-A	30 yr		10 yr	15 yr	20 yr	
Summer	Year		1949	1947	1931	1952	
	S/N		1.04	1.20	1.05	1.88	
	Jump	—	0.7 mb	+89 mm	+47 hr	—72 hr	
	Range-B		25 yr	25 yr	30 yr	30 yr	
	Range-A		20 yr	25 yr	20 yr	25 yr	
Autumn	Year				1934		
	S/N				1.31		
	Jump	—	—	—	+43 hr	—	
	Range-B				30 yr		
	Range-A				10 yr		

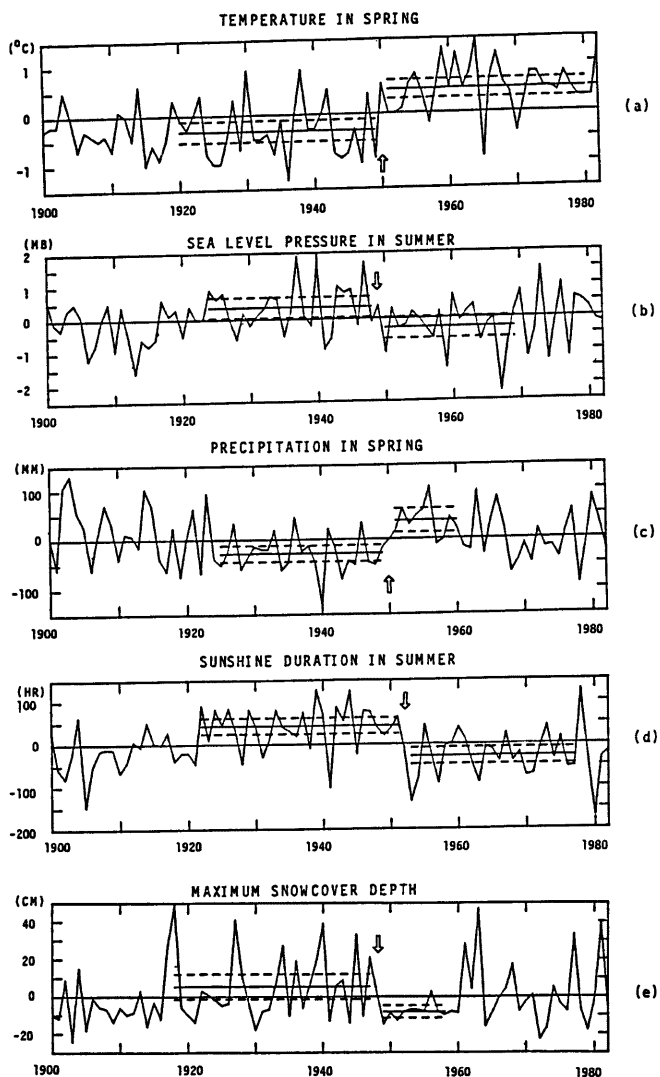


Fig. 9 The detected jumps for climatic elements averaged over Japan. Arrows indicate the time of jump appearance with S/N ratio greater than 1.0. The jumps for spring temperature, summer sea-level pressure, spring precipitation, summer sunshine duration and maximum depth of snowcover are given in (a), (b), (c), (d) and (e), respectively.

このように、種々の気候要素のジャンプが同一の時期に共通して検出された事は、偶然的現象だと考えるよりは、大気大循環の何らかの唐突な変動に伴うものだろうと考える方が自然である。1950年頃のジャンプは、秋の季節では、検出されていない。ジャンプの地理的分布に対応して、地球上のどこかに節目が存在する筈であり、丁度、日本がその節目に位置しているような場合には、世界的にジャンプが発現していても、わが国でジャンプが検出されない場合があり得る。1950年頃の気候ジャンプが大気大循環の唐突な変化に伴うという仮説を固めるためには、全世界的な観測データの本格的な解析が必要であり、それは現在準備中である。

8. 気候ジャンプと外部要因の変動

ここで問題にした『気候ジャンプ』は、Lorenzの準自律性(Almost-Intransitivity)におけるリジームの遷移との関連で取り上げたので、このリジームの遷移と1950年頃のジャンプとの関連を調べる事は有意義である。そのために、先ず現在の気候が仮に他律的(Transitive)だとすると、『気候ジャンプ』と時間的に一致した変動が、外部強制作用の時系列に認められる筈なので、そのような外部強制の変化を調べる事とした。もしも、『気候ジャンプ』と時間的に一致した外部強制の変動が認められない場合には、『気候ジャンプ』が準自律性におけるリジームの遷移と関連している可能性が濃厚となると考えられる。

気候を支配する主な外部要因(気候とのフィードバック過程を持たない要因)としては、太陽放射、 CO_2 などの大気微量成分、エアロゾルの変化が挙げられる。他律的な気候システムでは、10年以上の時間尺度においては、普通、大気は準平衡状態を保ちながらこのような要因の変化に対応していると考えられる(Mitchell¹⁶⁾)。大気中の CO_2 の濃度は、最近の研究によると(Nefel *et al.*¹⁶⁾、18世紀半ばに約280 ppmであったが、現在では約340 ppmとなっている。その温室効果のための温暖化作用は周知の事であるが、Fig. 10に示すように、ジャンプに対応するような唐突な変化は考えられない(Mitchell¹⁵⁾)。

太陽放射の信頼出来る直接観測は、1978年から人工衛星に搭載した空洞太陽放射計によって始めて可能となったので(Hickey *et al.*¹⁷⁾)、ここで着目しているジャンプの発現した1950年頃のデータが存在しない。

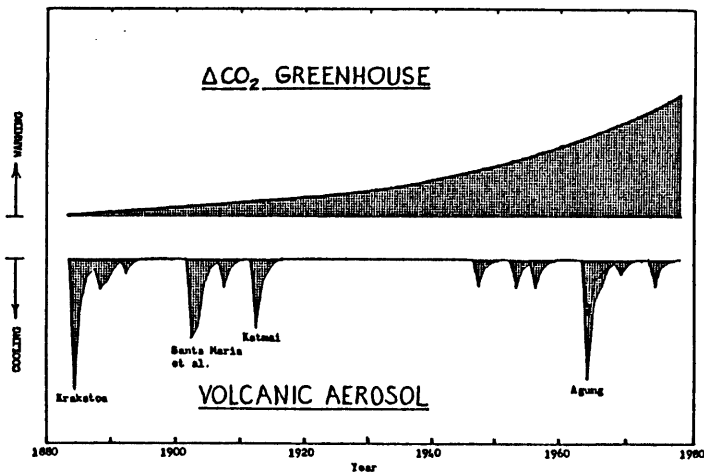


Fig. 10 Possible influences of increasing CO_2 and volcanic aerosols in the stratosphere (reproduced from Mitchell¹⁵⁾).

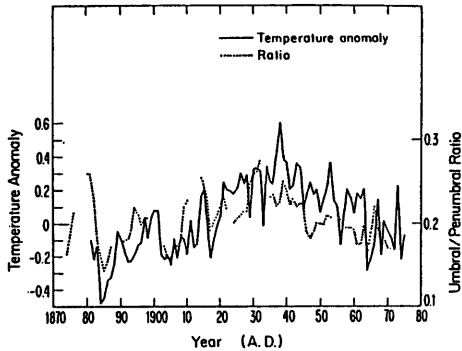


Fig. 11 Umbra/penumbra ratio of the sun spot (broken line) and surface air temperature anomaly (solid line) averaged over the Northern Hemisphere (reproduced from Hoyt²⁰⁾).

1950年頃に唐突な変化があったかどうかは判らない。

Gilliland⁸⁾ は、太陽の直径の変化が日射の強さに関係するとし、気候変動を論じている。しかし、その卓越周期は約80年であるので、このような変化がジャンプをもたらしたと考えるのは困難である。太陽黒点数 (Wolf 数) の変化には、11年の周期が卓越していて、やはりジャンプに対応する唐突な変化は認められない。また太陽活動の一つの指標として良く用いられる地磁気変動度 (Ap index) についても (Valley¹⁹⁾、Lehnhart Tape, NOAA のデータを調べたが、1950年頃のジャンプに対応する唐突な変化は認められない。Hoyt²⁰⁾ が、太陽黒点の灰色の部分の面積に対する黒色の面積の比 (Umbra/Penumbra Ratio) が太陽放射の強さに関係しているとの仮説を提出した (Fig. 11)。Hoyt の与えた北半球平均気温の変化において、19世紀末の低温から1930～1940年の高温への変化、そして1970年の低温という長期的推移に対しては、Umbra/Penumbra Ratio の変化との平行性が認められる。しかし10年以下の周期については Umbra/Penumbra Ratio の変化と気温との平行性は良くない。Hoyt の Umbra/Penumbra Ratio が1940年代の中頃に唐突に減少しているが、これを1950年頃のジャンプの発現の原因と考えるのは困難である。北半球や全球平均気温の最近の解析でも (Yamamoto *et al.*¹¹⁾, Jones *et al.*²¹⁾ and Folland *et al.*²²⁾), Umbra/Penumbra Ratio が1930年代から1940年代前半に大きい値を示し、その後小さくなっている事に対応する気温変化が見られない。さらに太陽物理学者によると、Hoyt の仮説は未だ定説ではなくて今後の研究が必要である (川口²³⁾)。

古くから取り上げられてきた外部要因の一つは、火山の大噴火による火山性成層圏エアロゾルである。噴火の気候に対する影響は、主に、噴出した二酸化硫黄が成層圏で硫酸液滴となって長期間滞留し、それが日射の下層大気への流入を減少させる、所謂、パラソル効果によるものである事が判ってきた。然し、噴火の詳細な情報が必ずしも充分でないために、その火山性成層圏エアロゾルの分布とその推移の評価は容易ではない。噴火の際の噴出物の総量の算定がされているが、そのうち、どの位の量の二酸化硫黄が、成層圏に噴き上げられ、そして、硫酸液滴となったかに関して、火山によってかなり異なる事が指摘されていて、信頼出来るような算定はない。そして、どのように地球上に拡散していくのかは、火山の地理的位置や季節にも依存する。それ故、火山性成層圏エアロゾル量の経年経化の信頼出来るデータは無い。しかし、火山の大噴火の情報を用いて何らかの仮定を基にし火山性成層圏エアロゾル量を概算したのが、Fig. 10 の下半分 (Mitchell¹⁵⁾) と Fig. 12 である (Yamamoto *et al.*¹¹⁾)。ここで特に注目されるのは、いずれの算定においても、1910年代の後半から1940年代の前半までの約30年間、火山性成層圏エアロゾル量が極めて少ない事である。この火山活動の静穏期の終結の時期が、ここで注目している1950年頃のジャンプの発現とはほぼ一致している。

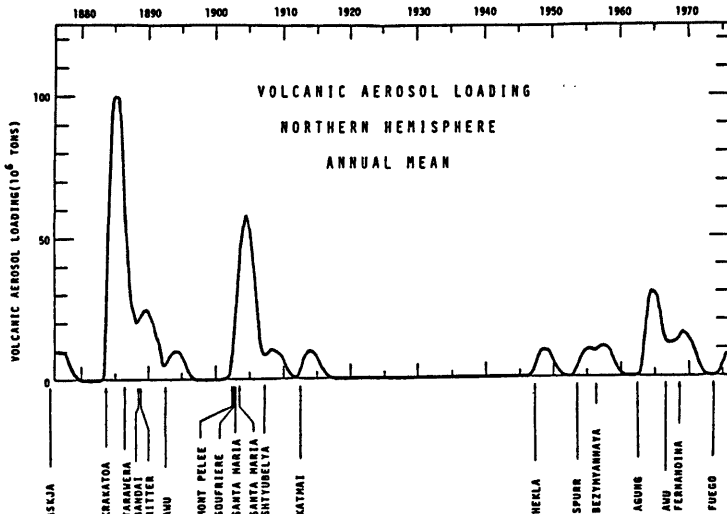


Fig. 12 Some examples of estimate of the volcanic aerosols in the stratosphere (reproduced from Yamamoto *et al.*¹¹⁾).

火山性成層圏エアロゾルがパラソル効果を及ぼして気候の寒冷化をもたらす事が考えられる (Yamamoto *et al.*¹¹⁾). ここでは示さないが、北半球平均気温が1910年代後半から1940年代の半ばまでの間に上昇し、それ以後1970年頃まで低下した事は、一見して、このパラソル効果を示しているかに見える。これらの北半球平均気温の推移は、約60年間に約0.5℃のゆるやかな変化であって、Fig. 3に見られるような10年位の時間尺度で約1℃のジャンプとどのように関連しているのか、

今後、研究する必要がある。一方、第4章で述べたように、気候ジャンプは地理的分布を持っていて、北半球平均気温の変化とどのような関係をもっているのか、今後の研究が必要である。すなわち、火山活動の静穏期の終結が、『気候ジャンプ』の直接的な原因なのか、それともそのトリガーとして『気候ジャンプ』の発現に寄与したのか、将来の研究課題である。かくして、現在の段階では、『気候ジャンプ』がLorenzの準自律性におけるリズムの遷移のあらわれであると結論出来ない。

なお、外部要因ではないが境界条件として大気との間に密接なフィードバック過程を持っている海面水温の分布について、特に注目されるのは観測データが古くから存在しているEl Niñoである。Rasmusson and Carpenter²⁴⁾の与えているEl Niñoの発現年をTable 3に再録した。この表で注目されるのは、1932年から1951年の間の20年間に1回しか発現していない事、特に1941年から1951年の間は1度も起こっていない事である。これがここで問題にしているジャンプとどのように関連しているのか、それとも関係していないのか、今後の研究にまつべきである。

Table 3 Years of El Niño appearance after Rasmusson and Carpenter.²⁴⁾

1 8 7 7	1 9 0 5	1 9 4 1
1 8 8 0	1 9 1 1	1 9 5 1
1 8 8 4	1 9 1 4	1 9 5 3
1 8 8 7	1 9 1 8	1 9 5 7
1 8 9 1	1 9 2 3	1 9 6 5
1 8 9 6	1 9 2 5	1 9 6 9
1 8 9 9	1 9 3 0	1 9 7 2
1 0 9 2	1 9 3 2	1 9 7 6

9. 結 語

今までの気候データの解析の殆どすべてにおいては、連続的な変化を前提としていたが、ここでは時間平均の不連続変化に着目する事とした。これは、Lorenz の非決定論的気候変動論で示唆されている準自律性 (Almost-Intransitivity) のリジームの遷移の重要性に着目したからである。Lorenz は、気候変動における準自律性のリジームの遷移の重要性を強調し、それが実際におけるとすれば、年々変動の時間平均の唐突な変化として現れるだろう事を示唆している。この示唆に従って、この研究では、10年以上にわたる時間平均値の不連続的な変化を『気候ジャンプ』と呼ぶ事とし、その検出する方法を提案した。

この方法を約80年間の日本の季節平均観測データに適用して、気温・気圧・降水量・日照時間けよび最深積雪に、統計的に充分的有意な『気候ジャンプ』が検出され、特に1950年頃に集中して発現している事が注目された。このような集中発現は、1950年頃のジャンプが、大気循環の何らかの唐突な変化に伴うものである事を示唆している、しかし、これを確かめるためには、全球的なデータ解析を今後行う必要がある。1950年頃の他に、1920年頃にも『ジャンプ』が発現しているとみられるので、ここで取り上げたよりも古い観測データの解析を進める必要がある。

この『気候ジャンプ』と準自律性のリジーム遷移との関連を確かめようとした。そのために、ここで注目したジャンプが他律性としての現象ではない事を確かめる必要がある。まず、他律性だとすれば、『ジャンプ』と時間的に一致した気候の外部要因の変化が認められる筈である。『ジャンプ』を引き起こすような唐突な変化は、CO₂ や太陽活動について、見当たらなかった。1910年代の後半以降途絶えていた火山の大噴火が1947年頃から頻発し出した事実は、1950年頃の『ジャンプ』の発現と時間的に一致しているので、火山噴火が『ジャンプ』の原因ではないかとの疑問がおこる。然し、これを確かめるためには全球的なデータ解析を行う事が必要である。この研究では、1950年頃の『気候ジャンプ』が準自律性のリジーム遷移と関連している事を確認するに到らなかったで、今後の研究課題である。

謝 辞

この小論で述べた研究について、有益な討論が京都大学地球物理学教室気象学研究室のコロキウムで与えられた。この研究で解析した観測データは気象庁統計課から供給された磁気テープデータであり、快く提供された気象庁の係官の好意に感謝する。最深積雪のデータについては京都地方気象台の根山台長に援助して頂いた。また、地磁気の変動に関する NOAA Lenhart Tape の使用は、京都大学地磁気世界資料解析センターの荒木助教授の好意により可能となったので、それぞれに謝意を表したい。この研究は、文部省科学研究費の援助によって進められた。此の研究でのデータ解析は、京都大学気候変動実験施設の電子計算機システム FACOM M340R を用いて行った。

参 考 文 献

- 1) Lorenz, E.N.: Climatic determinism. Met. Monogr., Vol. 8, 1968, No. 30, pp. 1-3.
- 2) Lorenz, E.N.: Nondeterministic theories of climatic change. Quat. Res. Vol. 6, 1976, pp. 495-506.
- 3) Lorenz, E.N.: Some aspects of atmospheric predictability. Problems and Prospects in Long and Medium Range Weather Forecasting. ed. by D.M. Burridge and E. Källen, 1984, Springer, pp. 1-20.
- 4) Iwashima, T. and R. Yamamoto: Time-space spectral general circulation model; I. Time-space spectral model of low-order barotropic system with periodic forcing. J. Met. Soc., Japan, Vol. 64, 1986, pp. 183-196.
- 5) Yamamoto, R., T. Iwashima, Sanga, N.K. and M. Hoshiai: Climatic jump; a hypothesis in cli-

- matic diagnosis. J. Met. Soc. Japan, Vol. 63, 1985, pp. 1157~1160.
- 6) Yamamoto, R., T. Iwashima, Sanga, N.K. and M. Hoshiai: An analysis of climatic jump. J. Met. Soc. Japan, Vol. 64, 1986, pp. 273-281.
 - 7) Kraus, E.B. and E.N. Lorenz: Numerical experiments with large-scale seasonal forcing. J. Atmos. Sci. Vol. 23, 1966, pp. 3-12.
 - 8) 気象庁：異常気象レポート'84, 大蔵省印刷局, 1984, 293頁.
 - 9) Kelly, P.M., P.D. Jones, C.B. Sear, B.S.G. Cherry and R.K. Ravakol: Variations in surface air temperature: Part 2. Arctic regions, 1881-1980. Mon. Wea. Rev., Vol. 110, 1982, pp. 71-83.
 - 10) Diaz, H.F. and R.G. Quayle: The climate of the United States since 1885: Spatial and temporal changes. Mon. Wea. Rev., Vol. 108, 1980, pp. 249-266.
 - 11) Yamamoto, R. and M. Hoshiai, 1980: Fluctuations of the northern hemisphere mean surface air temperature during recent 100 years, estimated by optimum interpolation. J. Met. Soc. Japan, Vol. 58, 1980, pp. 187-193.
 - 12) Karl, T.R. and W.E. Riebsame: The identification of 10- to 20-year temperature and precipitation fluctuations in the contiguous United States. J. Climate and Appl. Met., Vol. 23, 1984, pp. 950-966.
 - 13) Gandin, L.S.: Objective analysis of meteorological fields. Israel Program for Scientific Translation, 1963, 242 pp. Jerusalem.
 - 14) Yamamoto, R.: Variability of northern hemisphere mean surface air temperature during recent two hundred years. Statistical Climatology ed. by S. Ikeda, et al., Elsevier, 1980, Dordrecht, 388 pp.
 - 15) Mitchell, J.M.Jr.: Empirical modelling of effects of solar variability, volcanic events and carbon dioxide on global-scale temperature since A.D. 1880. Weather and Climate Response to Solar Variations ed. by B.M. McCormac. 1983, Colorado Assoc. Univ. Press, Boulder, Colorado, pp. 265-272.
 - 16) Neftel, A., E. Moor, H. Oeschger and B. Stauffer: Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric CO₂ in the past two centuries. Nature, Vol. 315, 1985, pp. 45-47.
 - 17) Hickey, J.R., B.M. Alton, F.J. Griffin, H. Jacobowitz, P. Pellegrino, R.H. Machhoff, E.A. Smith and T.H. Vonder Haar: Extraterrestrial solar irradiance variability: two and one-half years of measurements from Nimbus 7. Solar Energy, Vol. 28, 1982, pp. 443-445.
 - 18) Gilliland, R.L.: Solar, volcanic and CO₂ forcing of recent climatic changes. Climatic Change, Vol. 4, 1982, pp. 111-131.
 - 19) Valley, S. L.: Handbook of Geophysics and Space Environments. McGraw-Hill, 1965, New York.
 - 20) Hoyt, D.V.: Climatic change and solar variability. Weatherwise, Vol. 33, 1980, pp. 65-69.
 - 21) Jones, P.D., T.M.L. Wigley and P.M. Kelly: Variations in surface air temperature: Part I. Northern Hemisphere, 1881-1980. Mon. Wea. Rev., Vol. 110, 1982, pp. 59-70.
 - 22) Foland, C.K., D.E. Parker and F.B. Kates: Worldwide marine temperature fluctuations 1856-1981 Nature, Vol. 310, 1984, pp. 670-673.
 - 23) 川口市郎：Umbral/penumbral 比に関する太陽物理学者のコメント（個人的会話），1984.
 - 24) Rasmusson, E.M. and T.H. Carpenter: The relationship between eastern equatorial Pacific sea surface temperatures and rainfall over India and Sri Lanka. Mon. Wea. Rev. Vol. 111, 1983, pp. 517-528.