アメリカ合衆国における月降水量の空間分布特性

砂田 憲吾*・小西 徹**・竹本真也***

Characteristics of Spatial Distribution of Monthly Precipitation in the United States

Kengo SUNADA, Toru KONISHI and Shinya TAKEMOTO

A basic analysis on the characteristics of spatial distribution of monthly precipitation in the United States is presented. Monthly hydrologic quantities seem to be effective for detecting a relation between the long periodic variations of atmospheric conditions and meteorologic backgrounds in a large scale area. Data of precipitation at 176 observation stations in the United States for 5 years, from 1984 to 1988, was used. First, the deviation power and the spatial scales of precipitation area are defined statistically, and characteristics of the power and the scales are examined. In the next, the two-variate Gamma distribution function is applied to obtaining a return period of a hydrological condition with large or small precipitation taking the spatial scale into account. At last, the relations between the spatial scales and distances between centers of high or low atmospheric pressure zones in each month in a year are also discussed.

Key words: monthly precipitation, deviation power, spatial scale, Drought'88

88年に北米地域に記録的な渇水が生じたが、この種の事象の客観的総括的な評価のためには、その激しさと空間的広がりとを同時に考慮する必要がある。本研究では、渇水を念頭にその原因である降水量に注目し、数千kmオーダーの広域を範囲とする月降水量資料に基づいて、その空間的分布特性の基礎的解析を行った。データはほぼ同一(Cf)気候域に属す合衆国本土内の観測点176地点の1984年から1988年までの5年間のものが用いられた。まず、多雨域と少雨域の特徴を分離して抽出し、それぞれの強度(平均値からの変動強度)と空間スケールを統計的手法に基づいて新たに定義した。多雨・少雨に関するそれらの指標をもとに降水の分布特性、年変動特性を考察した。続いて、変動強度と空間スケールを同時に考慮する生起確率分布を試算して、多雨・少雨事象の評価法を例示した。さらに、同時に得られるもう一つの空間スケールの特徴的距離(第2空間スケール)と大規模な気圧配置とを比較考察した。解析の結果、多雨については変動強度が、少雨についてはその空間的スケールが重要であること、88年渇水は特にその空間的規模の大きい激しい少降水状況であったこと、第2空間スケールは高低気圧間の距離に対応することなどが分かった。

キーワード：月降水量，降水変動強度，空間スケール，88年渇水

I. はじめに

1988年、春から夏にかけてアメリカ合衆国中西部・カナダに及ぶ広範囲の地域で記録的な渇水が生じた。この渇水は農業生産の中心地域に生じたこともあり、国内外で大きな関心が寄せられた。Heim (1988) は、この渇水状況が経験的に32年ぶりもしくは54年ぶりであるとしているが、こうした現象の生起頻度には客観的な評価がなされるべきであろう。渇水状況は、その“強さ”と空間的な“広がり”と時間的な“持続性”とで意味づけら

れるが、現在のところ、これらの点を同時に考慮した現象の総括的な特性評価の手法は未整備である。

一方、渇水現象ではより長い持続性を示す無降雨状況およびその背景となる気象要因との関係が明らかにされる必要がある。この場合、時間スケールの増加と共に空間スケールも増大する。アメリカ合衆国では、わが国や他の地域では得難い広範囲の良く管理された長期の気象資料が蓄積されている。この種の資料によれば、無降雨状況について、大気・気象の長周期変動に対応するスケールで議論し得るものと期待される。

本論文では、渇水状況をもたらす主要因としての降水

* 山梨大学工学部 Dept. of Civil and Envir. Engg., Yamanashi University

** 東電設計㈱ Toden-sekkei Consultant Ltd.

***神戸市役所 Kobe City Office

量にまず注目し、88年時の降水量の状況を再確認しながら、合衆国本土地域の降水量の空間分布特性について基本的な解析を進め、降水の多少の規模に関する検討を行ったものである。本来は降水現象についての十分な時間（経年変化）特性も同時に考慮すべきであるが、ここでは最近5ヵ年についてのみ時間的傾向を調べている。

II. 88年渇水の状況と月降水量

図-1は合衆国商務省と農務省で合同で発行している週間気象速報（Weekly Weather and Crop Bulletin, 1988. 6）に掲載された渇水最盛当時のパーマー指標（Palmer Drought Severity Index）の分布図である。パーマー指標は、30年間以上の各地点の流出、土壌水分、蒸発散資料に基づいて、各地点各月ごとに水収支上平常状態に保つべき降水量を基準として、実現した降水量による渇水の程度を指標化したものである（Cooly, 1978）。この分布に類似のパターンは、強度は異なるものの、同年4月から7月上旬まで続いた。この指標は、週ごと地点ごとの渇水状況を知るには最も合理的かつ実用的な方法の一つではあるが、計画論の立場から合衆国全域にとっての現象の評価法としては十分ではない。さらに、背景にある気象との関係を考察するには降水量に注目する方がより直接的である。

本研究では、時間的持続性を考慮して基本時間スケール1ヵ月の降水量を考える。Blackmonら（1984）によれば、大気大循環における長周期変動の検出には月平均データが適当とされている。この変動は10日～数10日の時間スケールをもち、中緯度域でのブロッキング高気圧や偏西風の強さの周期的変動（インデックスサイクル）など異常気象の要因とされる大気大循環の変動の基本的な時間スケールに対応している。本論文では、降水の変化とそれをもたらす気象原因については初歩的な検討にとどまるが、この後、それらとの関係を議論する場合にも月平均での扱いは有効と考えられる。

図-1 渇水深刻度指標⁹⁾(1988. 6)

図-2 月降水量観測地点（合衆国本土）

図-2は、前述の週間気象速報に1ヵ月ごとに提供されている月降水量（月平均気温を含む）の観測地点（○印最大223地点）を示す。距離的に極端に偏りのない観測地点が設定されている。同図中の破線は、Köppenによる区分（福井ほか, 1985）を参照し、地形を考慮して2分した気候域の境界を示す。すなわち、破線より東側は温帯多雨気候（Cf）を中心とし、それに隣接する草原気候および冷帯冬雨気候の地域（以下Cf気候と総称する）に、西側は砂漠気候およびそれを囲む草原気候、冷帯冬雨気候などの気候に属す地域である。

III. 降水量の変動強度と空間スケール

先の月降水量・気温資料には30年間（1951—1980）の平均値からの偏差も与えられている。降水量を対象として以下のような空間相関を考えていく。sを観測点位置、jを観測点数とし、

$$C(\lambda) = \frac{1}{N_{\lambda}} \sum_{i=1}^j [p(s_i) \cdot p(s_i + \lambda)] \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $C(\lambda)$ は空間相関関数、 λ はたとえば100kmきざみの階級距離、 N_{λ} は $(\lambda \pm 50\text{km})$ の区間に含まれる $p(s_i)$ と $p(s_i + \lambda)$ の積の組合せ数、すなわち $N_{\lambda} = j(j-1)/2$ 、 p は月降水量の偏差であり、多降水、少降水に応じて後述のように定義する。基礎となる2地点間の実距離は、各観測地点の経緯度を用いて、球面三角法により算出する。

変動強度を次式で定義する。

$$C(0) = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j [p(s_i) \cdot p(s_i)] \dots \dots \dots (2)$$

さらに、式(2)を用いて空間相関係数を次式で定義する。

$$p(\lambda) = \frac{C(\lambda)}{C(0)} \dots \dots \dots (3)$$

以上の統計的手法により解析を進める。この場合、降水の平年値からの変動は多降水と少降水の場合では後述するように分布が歪むため、それらを同時に扱うのは適当ではない。さらに、同時に扱うと同一多・少降水域で

図-3 空間相関係数の例と第1, 第2空間スケール

は両方とも同じ算定値が持ち込まれてしまう。ここでは多降水と少降水の分布特性を抽出するために、降水量データを以下のように分離して解析する。30年平均値からの変動分のデータを用いて、値が正のものを p^+ 、負のものを p^- とする。それらに応じたデータの個数を j^+ 、 j^- とする。以下の解析手順では、値が負の場合について例示する。

〈変動強度と空間スケールの算定〉

- 1) 対象とする全観測点でのデータ(変動分) p を正負によって、 p^+ 、 p^- 、0に分ける。
- 2) そのデータのうち、 $p=p^+$ 、0のものを0とする。これは少降水域だけを取り出すフィルター操作である。
- 3) 式(2)より求まる $C(0)$ を変動強度の指標 P_d とする。
- 4) 式(3)により、空間相関係数を指数関数 $P(\lambda)=\exp(-\alpha\lambda)$ で近似し、その空間スケール(第1空間スケール)として $L_d=1/2\alpha$ で定義する。
- 5) 別の空間スケールの特徴(第2空間スケール)が認められる場合には、目視により判読して求める。

図-3はこのようにして得られる空間相関係数の例と、空間スケール決定の方法を模式的に示している。

なお、本論文では以降において多降水を多雨、少降水を少雨と呼ぶことにする。さらに、以下では特に混乱を与えない範囲で、変動強度、空間スケールをそれぞれ単に、強度、スケールと略称する。

IV. 多雨・少雨の変動強度と第1空間スケールの特性

前章の手順で解析していく場合、降水をもたらしている原因や機構に極端な差異のあるデータが含まれるのは適当ではない。この点については、先に合衆国本土全体を対象とする場合とCf気候域を対象とする場合との違

(a) 多雨・少雨強度

(b) 多雨・少雨スケール

図-4 多雨・少雨の強度とスケールの経年変化

いを比較している(砂田・小西, 1990)。それによると、強度については両者の傾向は似ているものの、スケールについては、同一の気候域(Cf)を対象とした場合の方が多雨・少雨間の相違がより明瞭に表されることが判った。本論文では、データ数は若干減少するが、依然として本土中心部地域を領域とするCf気候域内の観測地点(図-2中破線部以东:176地点)を対象として、以下に解析・検討を進める。

1. 強度とスケールの経年変化

前章の解析法により得られた多雨・少雨強度および多雨・少雨スケールの経年変化は図-4のようになる。

図-4(a)によれば、少雨強度が多雨強度を下回る傾向が知れる。これは当然の結果であって、0以下の降水はあり得ないことから、少雨強度に限界があることに他ならない。ただし、88年4~6月では少雨強度が多雨強度を

図-5 多雨・少雨における強度とスケールの相関

図一六 強度の(時間)自己相関係数

図一七 スケールの(時間)自己相関係数

図一八 多雨・少雨の強度とスケールの発生頻度

超えており、当時の渇水の激しさを裏付けている。少雨強度としては86年9月が最高値を示すが、その時の少雨スケールは小さく、実際にも大きな渇水問題は生じていない。図-4(b)から少雨スケールは概ね多雨スケールを上回り、少雨はより広い範囲に生ずる傾向にあることが判る。渇水時の88年6月のスケールは極めて大きい。

図-5は強度とスケールに関して、それぞれ多雨と少雨の場合での相関を示したものである。強度については相関が認められないが、スケールでは逆の相関がある。これは、多雨少雨を個別に定義していることによるが、特に少雨スケールの増大と共に多雨スケールは減少してほぼ一定になっており、その範囲では、降雨域の規模によらず無(少)降雨の規模が議論できることを示す。

図-4では多雨強度には年変化も読み取れる。この点に関して、各指標の(時間)自己相関係数を調べると図-6, 7のようになる。図-6に示される強度では、相関値は十分ではないものの、多雨ではかなり明瞭な年周期変化があり、少雨についても同様な傾向が認められる。年間の気象変化に応じて、降雨域(無降雨域)の広がり大きく変化しながら、時期的にはどこかの地域に毎年同様な降雨があることが判る。一方、図-7のスケールについてみると、多雨の場合もそのようであるが、特に少雨の場合年変化は認められない。

2. 強度とスケールの相関と発生頻度

強度とスケールの両者に関して100 (km), 1 (inch²)

(a) 強度について積分した場合

(b) スケールについて積分した場合

図-9 多雨の発生頻度

(a) 強度について積分した場合

(b) スケールについて積分した場合

図-10 少雨の発生頻度

ごとの発生頻度を同時に示すと図-8 のようになる。前述の、多雨は集中してその強度が大きく、少雨は空間的な広がりが大きいことが追認される。強度とスケールの相関係数 (r) を求めると、多雨では $r=0.480$ 、少雨では $r=0.465$ となる。両者の相関は必ずしも高くなく、第一次近似的な取り扱いでは、多雨傾向は強度で、少雨傾向は空間スケールだけでも議論できそうである。参考までに、気温 (高温、低温) について全く同様の解析を行った結果によれば、空間スケールのオーダーは少雨の場合と同程度であるが、図-8 のような強度またはスケールへの偏りの違いは高温・低温の場合には認められなかった。

解析に用いた資料は5ヵ年であり、この年数では多雨・少雨の発生確率を議論するには十分ではない。しかし、確率値などの絶対値は試算による参考程度にとどめ、多雨・少雨事象生起の定性的な比較を進める。

図-9、図-10はそれぞれ、多雨・少雨の強度方向、スケール方向に積分したデータ数 (頻度) の分布を示す。いずれの場合もガンマ分布で近似し得る分布と考えられる。実際には、強度とスケールとを同時に考慮する必要があり、ここでは2変数ガンマ分布を仮定し、以下のよう扱う。

単純で重要な場合として形状母数が等しいと仮定すると、2変数ガンマ分布の密度分布は次のように表される。

図-11 強度スケールの同時超過確率 (年)

$$f(x_1, x_2) = \frac{(x_1 x_2)^{(\nu-1)/2}}{\Gamma(\nu) (\sigma_1 \sigma_2)^{(\nu+1)/2} (1-\rho) \rho^{(\nu-1)/2}} \times \exp\left\{-\frac{x_1}{\sigma_1(1-\rho)} - \frac{x_2}{\sigma_2(1-\rho)}\right\} \times I_{\nu-1}\left(\frac{2\sqrt{\rho}}{1-\rho} \sqrt{x_1 x_2}\right) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 x_1, x_2 は変数、 $\Gamma(\nu)$ はガンマ関数、 $I_\nu(z)$ は ν 次の変形ベッセル関数であり、 σ_1, σ_2, ρ は定数である。

長尾・角屋 (1971) は全標本を用いる母数推定として、積率解により、形状母数 ν を既知とする場合について以

図-12 高・低気圧の間隔と第2スケール

下の式を与えている。

$$\sigma_1 = \frac{x_1}{\nu}, \quad \sigma_2 = \frac{x_2}{\nu}$$

$$\rho = \frac{\overline{x_1 x_2}}{\overline{x_1} \overline{x_2}} - \nu = r$$

ここに、 r は x_1, x_2 の標本相関係数である。

図-9, 10の結果から $\nu = 2$ とおくことができ、 x_1, x_2 をそれぞれスケール、強度に対応させれば、データを用いて各定数が求まる。それらの結果から、

$F_1(x_1) = \int_0^{\infty} f(x_1, x_2) dx_2$, $F_2(x_2) = \int_0^{\infty} f(x_1, x_2) dx_1$ を数値積分によって近似値を求め、図-9, 10の縦軸の比率に換算して示せば同図中の曲線ようになる。資料年数の不足のために適合度は十分ではないが、大略妥当な分布形が得られている。

以上の解析を進めれば、形式的に強度とスケールを同時に考慮した超過確率もしくは確率年(T)が求まる。図-11は多雨・少雨のそれぞれの場合について得られた確率年を示している。[参考までに、期間中の多雨時・渇水時の場合を敢えて読み取れば、85年の多雨(スケール: 1050km, 強度: 13.5inch²)は10年程度、88年渇水(スケール: 4950km, 強度: 5.9inch²)は120年ほどになる。]同図の確率年の分布は前章までの傾向に対応しており、少雨の強度の頭打ちは確率年の急な変化で示される。一方、多雨の場合にはスケールに限界があり、降雨原因となる

スケールの上限がここでの定義でほぼ2000km程度であることが知れる。

V. 第2空間スケールと背景気象

図-3に例示された第2スケールは多雨・少雨の背景となる持続的な気圧配置に対応していると考えられる。今回の解析で第2スケールの存在を調べた結果、多雨では60ヵ月のうち51%に、少雨では49%に認められた。このうち88年について、天気図(New York Times, 1988)に記された高低気圧の間隔を読み取って比較すれば図-12のようになる。毎月5日, 15日, 25日の高低気圧の間隔を判読し、各月3回の極端な値の違う場合を除いて平均したものである。多雨～低気圧間隔では該当する解析例は少なかったが、少雨～高気圧の間隔では結果は比較的明瞭な傾向を示し、第2スケールと気象原因の高気圧間隔は大きさがほぼ等しくなっている。第1スケールはその定義から多雨・少雨域の拡がりの指標としての空間距離が示されたが、図-12の結果によれば、第2スケールはそのまま実際の距離を表し、気圧配置などと直接関係づけられそうである。

VI. おわりに

降水量の空間的分布特性を気候変動との関連で検討していくための基礎的解析を行った。月降水量に注目し、それに応ずる空間スケールの増大に耐え得ると考えられるアメリカ合衆国の場合を扱い、降水特性を、“変動の強さ”と“空間スケール”とで議論した。たまたま欠落していたという理由で資料年数に限界があり、長期的変動特性にまでは及ばなかったが、本研究で得られた結論的事項を要約すれば、以下ようになる。

- 1) 多雨, 少雨の特性を指標化するために、それぞれにおいて変動強度と空間スケールを統計的に定義した。
- 2) 定義された変動強度と空間スケールによれば、多雨・少雨とは変動強度には月変化・年変動には周期性があるが、空間スケールには周期性が認められない。
- 3) 多雨は変動強度により、少雨は空間スケールにより、それぞれの特性が特徴づけられる。
- 4) 変動強度と空間スケールを同時に考慮する多雨・少雨事象の生起確率を試算し、評価法を例示した。
- 5) 多雨域の空間スケールには限界があり、合衆国本土(Cf気候を主とする地域)では、本論文の定義では2000km程度である。

検討の過程では、少雨の場合、第2空間スケールが高気圧の間隔とほぼ同程度の大きさを示す傾向も見られた。今後、気象要因や気圧配置についてのより適切な評価に

基づいて類似の解析を進めことも有効と考えられる。

本研究のきっかけは88年渇水が契機となっている。水資源の立場から“渇水”を扱うためには、ここで示された解析に加えて、水需要や水管理システムのネットワークのスケールなど、さらに広範なデータを用いる必要がある。それらはより複雑なものになるであろうが、きわめて興味深い問題でもある。

最後に、追加資料の入手にご協力頂いた、信州大学寒川典昭助教授に深く感謝致します。

引用文献

- 1) Blackmon, M.L., Y.H. Lee and J.M. Wallace (1984): Horizontal structure of 500mb height fluctuations with long, intermediate and short time scales, *J. Atmos. Sci.*, **41**, pp. 961-979.
- 2) Cooley, D.S. (1978): Drought severity chart, Technical Procedure Bulletin No. 254, USDC-NOAA NWS, pp. 1-6.
- 3) 福井英一郎ほか編 (1985): 日本・世界の気候図, 東京堂出版, pp. 162.
- 4) Heim, R.R. Jr. (1988): About that drought . . . , *Wetherwise*, **41**, (5), pp. 2666-271.
- 5) 気象庁編 (1989): 異常気象レポート '89, pp. 160-161, pp. 138-145.
- 6) 長尾正志・角屋睦 (1971): 二変数ガンマ分布とその適用に関する研究(2)—二辺数ガンマ分布の母数推定法一, 京大防災研究所年報, 第14号B, pp. 43-85.
- 7) New York Times (1988): Weather Report, 資料として1988. 1~1988. 12.
- 8) 砂田憲吾・小西徹 (1990): アメリカ合衆国における月降水量の空間分布特性について, 水文・水資源学会研究発表会要旨集, pp. 124-127.
- 9) USDC・USDA (1988): Weekly wether and crop bulletin, **75**, (27), pp. 4. 資料として1984. 1~1988. 12.

(1991年7月30日受付, 1991年11月21日受理)