

DAD解析による少雨の時空間分布特性に関する研究

STUDY ON TEMPORAL AND SPATIAL DISTRIBUTION OF SCARCE PRECIPITATION BY DEPTH-AREA-DURATION ANALYSIS

葛葉泰久¹・友杉邦雄²・岸井徳雄³・早野美智子⁴

Yasuhisa KUZUHA, Kunio TOMOSUGI, Tokuo KISHII and Michiko HAYANO

¹正会員 博士(工学) 防災科学技術研究所 部主任研究官(〒305-0006 つくば市天王台3-1)

²正会員 博士(工学) 京都大学防災研究所 助教授(〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

³正会員 博士(工学) 防災科学技術研究所 チーム長(〒305-0006 つくば市天王台3-1)

⁴正会員 博士(学術) 防災科学技術研究所 特別研究員(〒305-0006 つくば市天王台3-1)

Depth-area-duration (DAD) analysis has been used in a lot of papers about temporal and spatial distribution of heavy rainfall for long years. In this paper, similar analytical method is used in order to clarify characteristics of temporal and spatial distribution of scarce precipitation that is main cause of drought. First, normalized precipitation by mean annual rainfall is defined. Next, depth-duration curve that is linear approximation is obtained. By this approximation and the result of depth-area analysis, DAD curve that represents fairly the data is obtained. Furthermore, the seriousness of drought is evaluated statistically by the similar method as drought-duration curve method.

Key Words: scarce precipitation, drought, depth-area-duration analysis, drought-duration curve, temporal and spatial distribution

1. 序論

我が国が被る自然災害のうち、渇水災害はその生起する頻度、一度生起した場合の影響範囲等から考えて、その対策の重要性が非常に高い災害であることは明らかである。そこで、防災のために渇水生起のメカニズムを明らかにすることが必須の事項となる。渇水災害の要因として、少雨、夏期の高温、水資源需給システムの問題等々、様々な物理現象・社会現象をあげることができるが、水文学的な見地から「少雨」がその主因であることは言うまでもない。近年、土木工学の分野でも、「降水」を物理過程ととらえた、力学的な扱いによる研究が数多くなされてきたが、時・空間的に比較的大きなスケールで生起する渇水災害については、現時点では確率的・統計的な現象の扱いが適当と思われる。

近年の主な渇水年として、1978年(S53)、1984年(S59)、1994年(H6)などがあげられるが、宝らは渇水持続曲線^{1,2)}(drought-duration curve; DDC)を用いるなどして、これらの渇水の時空間構造に関する分析を統計

的に行っている^{3,4)}。例えば文献3)では、過去約100年分の全国46地点における月降水量データから求められたDDCと1994年の降雨強度時系列を比較することにより、渇水規模と持続性の評価がなされている。一方、渇水災害の対極にある災害とも言える豪雨災害については、その解析手法として、最大雨量の時空間的分布を明らかにする、DAD (depth-area-duration) 解析がよく用いられる⁵⁾。

本論文では、DAD解析的な手法により、少雨の時空間構造を評価することを目的とする。その中で、DDCと同様の生起確率を用いた渇水規模の評価も試みる。

2. データ

用いたデータは気象庁提供のアメダス日降水量データ24年分(1976年~1999年)である。アメダスデータを用いた理由は、本論文の目的の一つである、「少雨の空間構造の解析」を行うために、できるだけ空間的に密なデータが必要であったためである。まず日降水量データを整理し、全観測点(1578点;一日でもデータが存在す

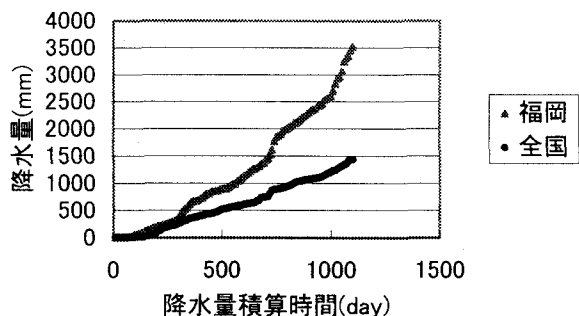


図-1 降水量と降水量積算時間

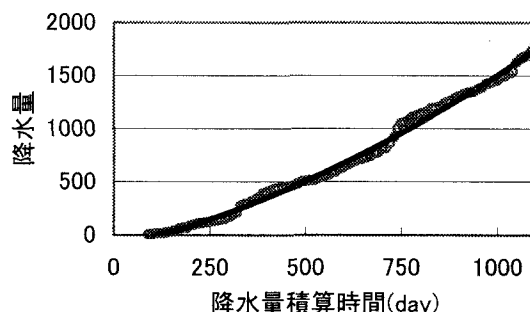


図-2 基準化した降水量と降水量積算時間

る観測点)における、8766個(1976年1月1日～1999年12月31日の日数)の日降水量からなる時系列データを作成した。ただし、この時系列データには相当数の欠測日が含まれている。それらの欠測日については、多量の降水があったとみなした。「長期の欠測」＝「少雨」と判定されるのを防ぐためである。

3. 日降水量データによるDD解析

まず、日降水量の時系列データを用い、DD (depth-duration) 解析を行う。ただし、ここで言うDD解析とは少雨を対象とするものであるから、豪雨を対象とする場合の、「降水時間 (duration) と最大地点降水量 (depth) の関係」ではなく、「降水時間と最小地点降水量」の関係である。また、降水時間としては、10日～1100日(約3年)を対象とした。具体的には以下の手順による。すなわち、

- 1) 各地点ごとに、8766個の日降水量時系列データから、 d 日間の積算降水量の移動和を求め、その移動和の最小値をもとめる。以後、 d を降水量積算時間と称す。また、 d は上述のように、10日～1100日とする。
- 2) 全観測点数分の最小10日～1100日降水量の最小値をもって、降水量積算時間ごとの「最小地点降水量」とする。

図-1中の、○を連ねた黒色の曲線は、このようにして求めたDD曲線である。この曲線は、日本全国の最小雨量の傾向、すなわちDD関係をあらわした図ではあるが、「渇水災害」という観点から見れば、合目的的とは言いがたい。この曲線がどの観測点のデータによって描かれたかを調べると、降水量積算時間が240日より小さい範囲ではおもに北海道日高支庁内の観測点、それより大きい範囲では北海道網走支庁内の観測点のデータであることがわかる。同じ図中の▲を連ねた灰色の曲線は、過去度々甚大な渇水災害に見舞われた福岡県内だけのデータを用いて同じ手順で求めたDD曲線であるが、このように、図-1のDD曲線は、渇水災害の起こり易さとはあまり関係なく、降水量の小さい地域の特性を反映す

るものとなっている。そこで次章では、降水量ではなく、「平均年降水量(mm)で基準化した降水量」をもとに解析を進めることにする。

4. 基準化した降水量を用いた解析結果

(1) 基準化した降水量

ここ以後、各観測点の平均年降水量で基準化した降水量を基本データとして用いる。「平均年降水量」は、いわゆる「平年値」と同様の概念であるが、用いたデータは最長で24年分であり、また下記の手順で求めたものである。すなわち、

- 1) まず、対象とする観測点を抽出する。条件として、「2月に26日以上、その他の月に28日以上の有効な観測値がある一年(これを有効年とする)が、20年以上あること」とする。
- 2) つぎに、1)で抽出した観測点について、有効年だけの年降水量を用いて平均年降水量を求める。
- 3) 有効年であっても欠測日を含む場合が多い。そこで各月の月降水量を、(データのある日の日降水量の合計) × (月の日数) / (データのある日の数) で求め、月降水量を合算して年降水量を求める。

前章で用いた観測点ごとの8766個からなる日降水量の時系列データを、これらの手順で求めた「平均年降水量」で除し1000倍したものを、「基準化した降水量」として用いる。ただし次節以降では、簡単のため、「基準化した降水量」を単に「降水量」と称して用いる。また、上記の「平均降水量算定基準」を満たす観測点は全部で606点(位置については図-7参照)であり、今後はこれらの観測点のデータのみを用いる。

(2) DD関係

前章と同じ手順で、ただし基準化した降水量を用いてDD曲線を求める(図-2中の○を連ねた曲線)。図中の実線は二次の多項式近似で求めた近似曲線であるが、降水量(p_0 ;mm)と降水量積算時間(d ;day)の間には、

$$p_0 = 0.0008d^2 + 0.8671d - 116.05 \quad (p_0 \geq 0) \quad (1)$$

なる関係がある。ただし、これは $d \leq 1100$ とした場合の関係で、 $d \leq 360$ の部分だけピックアップすると、

$$p_0 = 0.0032d^2 - 0.3741d + 15.845 \quad (360 \geq d \geq 90) \quad (2)$$

となる。式(2)を後のDA (depth-area) 解析に用いる。

(3) 生起確率による渇水規模の評価

本節では、1978年、1984年、1994年の渇水規模について、生起確率を用いた評価を行う。なお、本節では吉川・竹内¹⁾、竹内²⁾を参考に考察を行う。

前節で求めたDD曲線は、本論文で対象としている1976年～1999年のすべての時系列データを用いて求めたものであった。ここでは、各年のDD関係をもとに、生起確率を求める。具体的には、以下のような手順に従う。すなわち、

- 1) 観測点番号 i , $day\ number$ (1976年1月1日を1, 1999年12月31日を8766とする) j の日降水量を $r_{i,j}$ とし, n 年 ($n = 1976, 1977, \dots, 1999$) における, 降水量積算時間 (日数) d に対する次式(3)のような統計量を作成する。

$$x_n^{(d)} = \min_{\substack{j \in J \\ i \in I}} \left\{ \sum_{j=1}^{j2(=j1+d-1)} r_{i,j} \right\} \quad (3)$$

ただし、ここで、 I は観測点番号の集合、 J は n 年に対応する $day\ number$ の集合であり、 $j1$ は n 年の1月1日～12月31日に対応する $day\ number$ である。

- 2) ある d に対し $x_n^{(d)}$ が N 個得られるとする。その場合、 k 番目に小さい $x_n^{(d)}$ の生起確率を「 N 年 k 位」という表記であらわす。

吉川・竹内¹⁾はDDCにおいて、 $P_k = k/(N+1)$ 、すなわち非超過確率を危険率と考えて考察を行っている。また、宝・池淵²⁾は $T_k = 1/P_k = (N+1)/k$ で与えられるリターンピリオドを用いて渇水規模を評価している。しかしそれらで使用されたデータは、観測年数にして、前者で40～50年、後で100年程度である。本論文で使ったデータは20～24年分のデータであり、リターンピリオド等で渇水規模を評価するには問題があると考えたので、以下、「 N 年 k 位」という表現を用いることにする。

図-3は、降水量積算時間と降水量の関係を示した図である。図中の細い実線を連らねた折れ線は、渇水規模が「 N 年 k 位」の「降水量積算時間-降水量関係」である。凡例には、「 k 」の値を示した。式(3)で示したように、これらの曲線を求める際に、集合 J を「 k 年に対応する $day\ number$ の集合」と考えたので、降水量積算時間 d が $d \leq 365$ の場合は23個の $x_n^{(d)}$ が得られるが、それより大きい場合には d に応じて得られる個数が少なくなる。ここでは、 $d \leq 360$ の場合、 $x_n^{(d)}$ 算定の際に起点と

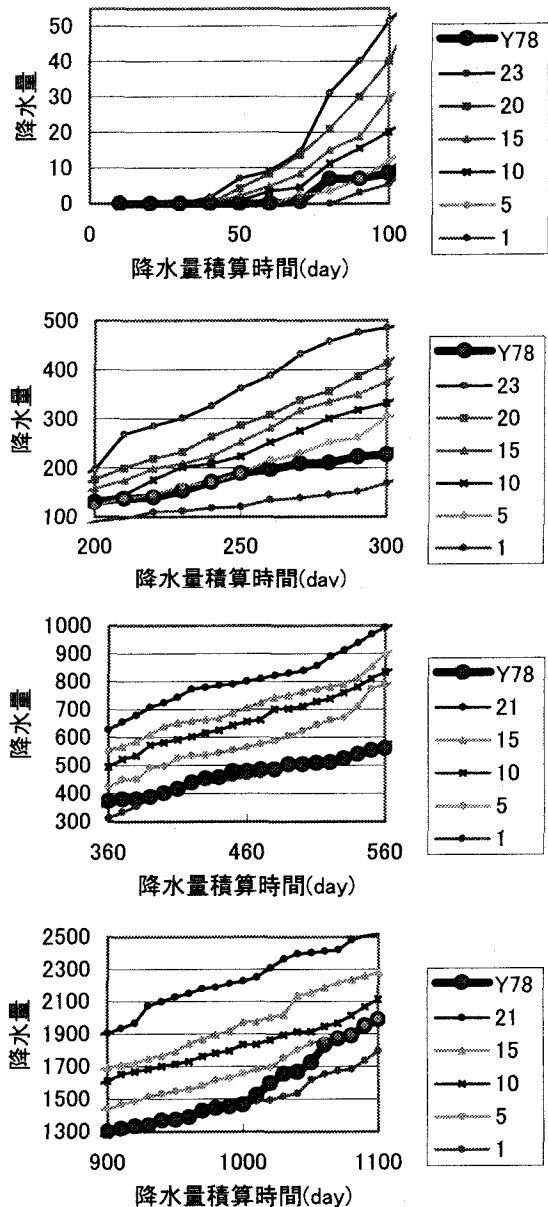


図-3 基準化した降水量と降水量積算時間。この図により渇水規模が確率的に評価される。降水量積算時間により、4つの図に分割されている。

する年を1976年～1998年の23年とし、それより大きい場合には1976年～1996年の21年とする。すなわち、前者の場合、図-3中の折れ線は「23年 k 位」に、後者の場合、「21年 k 位」に対応していることになる。この図は、確率的に表現された渇水規模と降水量積算時間-降水量の関係をあらわしたものである。そこで、つぎにこの図を用いて、著名な渇水年である、1978年、1984年、1994年の渇水規模を評価してみる。そこで、これらの3年を対象として、それぞれの年の「降水量積算時間-降水量関係」を求める。ただし、これらの3年を対象とする $x_n^{(d)}$ を求める際に、式(3)ではなく、つぎの式(4)を用いる。すなわち、

$$x_n^{(d)} = \min_{\substack{j \in J \\ i \in I}} \left\{ \sum_{j=1}^{j2(=j1+d-1)} r_{i,j} \right\} \quad (4)$$

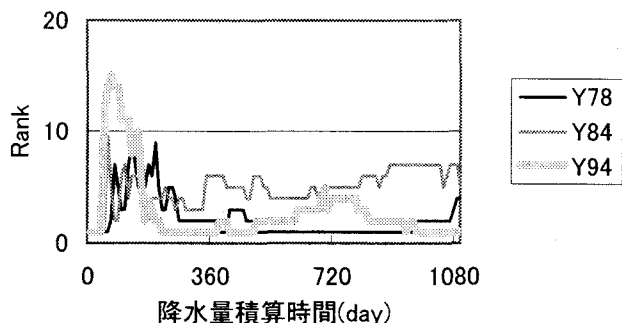


図-4 1978年、1984年、1994年の渇水規模が降水量積算時間の増加とともに変化する様子を表した図

である。例えば $d=1100\text{day}$ の場合、式(2)では「 $n-1$ 年を起点とするが n 年の少雨故に降水量が小さくなった場合」を含み得ないからである。ただし、明らかに n 年の少雨とは関係のない場合を含まないように注意する。

図-3中に、例として1978年の降水量積算時間-降水量関係を太い実線で示した。これらの図、またここで示しきれなかったデータから、以下のことがわかる。

- 1) $d \leq 60\text{day}$ においては、降水量は0であり、(23年)1位の少雨である。
- 2) その後、 $d=250$ まで、5 位前後の少雨傾向を示す。
- 3) その後、 $500 \leq d \leq 930$ で、1 位の少雨傾向を示すなど、概ね3位以上の記録を示すが、1位~3位までは降水量にあまり差がない。

このように、1978年の少雨の異常さが評価できる。あとの2年についても同様の図を作成したが、紙数の都合で図は割愛する。つぎに、この3年について、横軸に降水量積算時間、縦軸に「ランク (N 年 k 位の ' k ')」として、降水量継続時間ごとの渇水規模の推移を示したのが、図-4である。いずれの年も、概ね $d \leq 200$ においてはそれほど目立った少雨の異常性を示すものとはなっていないが、 d がそれより長い場合、特に1978年、1994年について、少雨の異常性が顕著である。

(4) DA関係・DAD関係

豪雨を対象としたDAD解析では、降水面積(area)とその最大面積降水量(depth)の関係を示すDA曲線を求める⁹⁾が、ここでは少雨を対象としているので、降水面積(後に述べる理由により、実際は走査円の半径を用いているので、以後、「平均化半径」と称す)と、最小面積降水量の関係をつぎのように求める。すなわち、

- 1) 4. (2)で求めたDD曲線上の点、つまり10day刻みの降水量積算時間ごとの最小地点降水量について、すべての観測点での同じ期間における降水量を求める。
- 2) 後述する面積固定法⁹⁾により、ある走査円の半径、すなわち平均化半径に対する「最小面積降水量」を求める。

- 3) 例えば、降水量積算時間50dayに対する最小地点降水量は0(mm)であるが、同じ値を示す「地点または期間が異なるデータ」は376個ある。そこで、1), 2)で求めた「ある平均化半径に対する最小面積降水量」のうち、最小の値を「最小面積降水量」とする。
- 4) 降水量積算時間をパラメータとし、平均化半径と降水量の関係をプロットする。

宝ら⁹⁾が豪雨のDAD解析において用いた面積固定法は、対象流域を格子で覆い、各格子点に降水量を与えるものである。そして、面積一定の円を全流域にわたって移動させ、円内の格子点における降水量値から、円内の領域の面積降水量を求め、円を移動させることによって、円の面積に対応する最大面積降水量値を求める。ただし、著者らは、走査円を移動させる際に格子点を用いるものの、各格子点での降水量値を求めず、単純に円内の観測点における降水量を算術平均することにより、面積降水量を求める。ここで、走査円内に6個以上の観測値がない場合は除く。そのため、平均化半径が小さい場合には、データ量が少なくなる。なお、計算資源の制約のため、平均化半径100km以下の場合は走査する格子間隔を1kmとして最小面積降水量を求めるが、それより大きな場合には格子間隔を5kmとする。

本来DA解析はdepth-area関係を求めるものである。しかし、本論文のように、少雨のDA関係を求めようとする場合、空間スケールを大きくとる必要があり、我が国国土の弧状列島という形状から、「面積」を大きくとった場合、例えば上であげた面積固定法を例にとるなら、降水量データのない海域が走査円内に含まれてしまう。そこで、本論文ではDA解析とは言いながら、あえて「面積」ではなく、「半径」と降水量の関係を求めることにする。なお、DA解析を行うにあたり、まずアメダス観測点を二次元のx-y座標平面上にプロットする⁹⁾。その際、北緯33度、東経129度30分の位置(平面直角座標への変換に使うI系の原点)を、原点とする(図-7参照)。また、走査円は直角座標系上で、(0,-300)、(1400,1400)を対角とする四角形に(走査円全体が)含まれる領域内を移動させる。

図-5は、以上の手順で作成したDA関係を示した図である。横軸は平均化半径(km)、縦軸は降水量であり、図中に降水量積算時間100day~350dayまでのDA関係を50day間隔で示した。平均化半径0kmの位置には最小地点降水量の値をプロットした。平均化半径が20kmの場合に、いずれの降水量積算時間の場合にも高い降水量を示しているが、これは図に示していない他の降水量積算時間のものについても、同じ傾向が見られる。アメダス観測点の配置間隔と、「円内に6個以上の観測データがあること」という条件を考え合わせるなら、条件にあった走査円はかなり少なくなる。実際、日本列島を覆った1km間隔の格子点のうち、条件を満たす円は400~1800

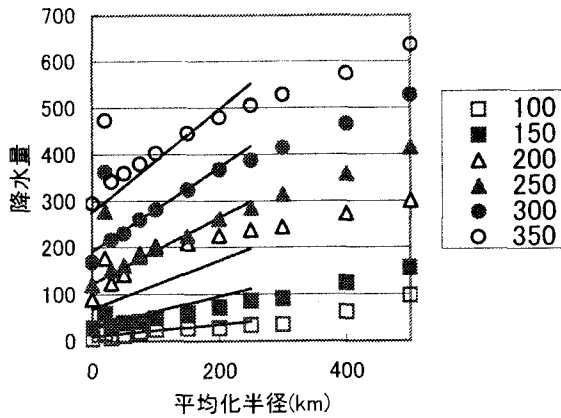


図-5 平均化半径と降水量の関係. 凡例の数字は降水量積算時間 (day) を表している. 図中にはあわせて直線回帰による近似直線も示されている.

程度である (この個数は、対象とする降水量積算時間によって有効な観測点の個数が変化するので一定ではない). その数は、平均化半径が30kmの場合と比較して、一桁小さい. 本章では独自の「平均年降水量が算定できる観測点606点」のみを対象として解析を行ってきたが、平均化半径20kmの場合に降水量が大きくなる理由は、その観測点の配置間隔と20kmという円の半径に起因すると考えられる.

平均化半径20kmの場合を除けば、降水量積算時間ごとに、平均化半径が増加するにしたがって降水量が増加する単調増加傾向を示す曲線が得られている. 平均化半径0km~500kmの範囲でそれらの曲線群を見れば、二階微分が負、つまり上に凸な曲線が得られたと言えるが、ここで、近似的なDA関係を得るために、平均化半径0km~250kmの範囲で、直線近似ができると仮定することとする. ただし、ここでは20kmの場合を除外する. 今、それらの直線を次式(5)であらわす.

$$P = ar + b \quad (5)$$

ここで、 P は降水量、 r は平均化半径(km)である. また、 b として、最小地点降水量と降水量積算時間 d との関係式 (式(2)) を用いる. つまり、

$$b = 0.0032d^2 - 0.3741d + 15.845 \quad (360 \geq d \geq 90) \quad (6)$$

である. 10day刻みで、 $90 \leq d \leq 360$ を満たす d について図-5のようなDA関係をプロットし、式(5)、(6)を用いて回帰直線、すなわち式(5)の a を求める. その結果得られた a と d の関係を示したのが図-6である. これらの関係は、次式(7)で近似できる.

$$a = 0.0039d - 0.2646 \quad (7)$$

以上より、DAD関係式として、式(5)、(6)、(7)が得られ

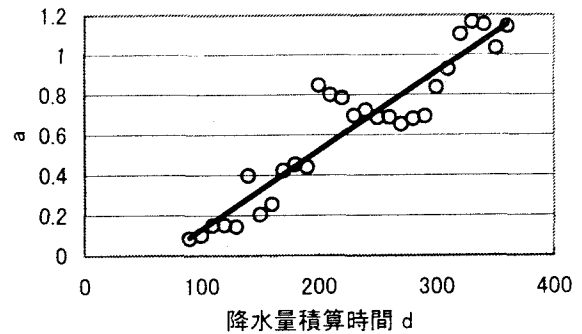


図-6 式(5)の a と降水量積算時間 d の関係

る. この関係を図-5中に実線で示す. $90 \leq d \leq 360$, $0 \leq r \leq 250$ という範囲内で、求めたDAD関係式が図-5中にプロットされたデータを良好に再現していることがわかる. ここまでに示したDAD関係式の詳細な物理的意味については今後の研究課題と考えるが、1) DD関係式が二次の多項式 (式(1),(6)) で表される、すなわち下に凸な曲線となるのは、時間スケールの増大に伴い、少雨傾向が緩和されるため、2) DA関係式が単調増加になるのは、空間スケールの増大に伴い、少雨傾向が緩和されるため、である.

最後に、「少雨の時空間分布構造」を明らかにするため、また、解析結果の妥当性を確認するため、時間スケール (降水量積算時間)、空間スケール (走査円の半径) と「少雨の顕著な地域」の関係を調べる. すなわち、上述のように、降水量積算時間 (50day~360day, 10day刻み) と平均化半径を変化させ、走査円を移動させた際に、いかなる領域で面積降水量が最小になったかを見る. 図-7は、面積降水量が最小となる走査円 (以後「最小円」と称す) を示したものである. ここに示していない他の降水量積算時間の同様の図も含め、これらの図から以下のことがわかる.

- 1) $d=200, 210$ dayの場合を除いて、半径500kmの最小円はすべて走査領域の南西隅に接する. これは、半径500km程度の広いスケールでは、南西日本で少雨傾向が顕著であることを意味する. ただし、南西隅で最小円が接することは、走査領域の条件を変えた場合、さらに南西方向に最小円が移動する可能性があることを示唆する. なお、 $d=200, 210$ dayの場合、半径500kmの最小円は、若干東に移動し、(775, 200) を中心にもつ.
- 2) d が220day以上の時、半径の大きな最小円は南西隅に、半径20kmの円 (d が220day以上の場合、すべて近畿地方を中心とする) を除く他の小さな円の多くは $y=0$ kmあたりに中心をもって西端に接する. また半径30, 50kmの円で、西端に極めて近いが接していないものもいくつかある. これらより、降水積算日数が220day以上のとき、半径400km以下のスケールでも、南西日本で少雨傾向が顕著であると言

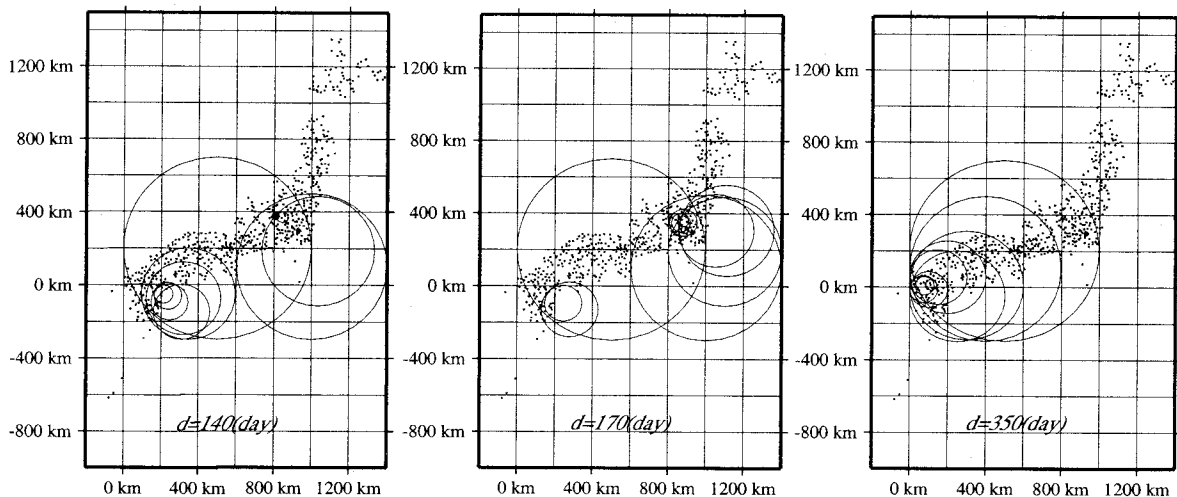


図-7 アメダス観測点(図中の点)と最小円。図中に各図の降水量積算時間を示した。最小円の半径は、大きいものから、500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 75, 50, 30, 20(km)である。

える。これも1)と同様、走査領域の条件を変えた場合、最小円がさらに西方向に移動する可能性はあるが、上述の半径30,50kmの最小円の傾向から、その程度のスケールでは、最も少雨傾向が強いのは九州中北部西側である(すなわち必ずしもさらに西方に移動するわけではない)と言える。

- 3) d が210day以下の場合、半径が300kmより小さいスケールでは、九州中部東側を中心とする地域と関東地方を中心とする地域で少雨傾向が顕著である。
- 4) かなり海域にずれている最小円がいくつかある。これは「走査円の走査範囲」に起因するもので、今後検討が必要な課題と考えるが、その多くは円内に東京都島嶼部の観測点を含んでいること、また我が国国土の形状から、走査円は多かれ少なかれ海域を含むことから、以上の結果が本研究の目的から逸脱していないものとする。

5. 結論

豪雨の時・空間分布特性を明らかにするのに用いられるDAD解析手法を、少雨に適用した。観測値である降水量データを用いた場合、研究目的である、渇水災害の起こりやすさとは関係なく、「もともと降水量が少ない地域」のデータによってDD関係が規定されてしまうので、降水量を年降水量の平均値で基準化したデータを降水量として用いた。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 最小地点降水量と降水量積算時間の関係を求めた。
- 2) 降水量積算時間が90day以上360日以下、平均化半径が250km以下の場合について、最小面積降水量と平均化半径の関係を求めた。

- 3) 以上の結果より、DAD関係式を求めた。その関係式は、データをプロットしたDAD関係をうまく再現するものであった。
- 4) おもな渇水年の少雨規模を確率統計的に評価した。
- 5) DA解析の結果得られた「最小円」から、少雨傾向とスケールの関係が得られた。

なお、本論文は、京都大学防災研究所水資源研究センターのプロジェクト研究「異常少雨現象の特性と予測」の成果の一部をまとめたものである。

参考文献

- 1) 吉川秀夫, 竹内邦良: 渇水持続曲線の性質とその応用, 土木学会論文報告集, No.234, pp.61-71, 1975.
- 2) 竹内邦良: 渇水持続曲線による渇水時水文特性の把握と水管理への応用に関する研究, 東京大学学位論文, 1982.
- 3) 宝馨, 池淵周一, 渡辺晴彦: 全国46地点の降水量データに基づく渇水の時空間分析と統計的評価ならびにそのマップ化, 科研費報告書「平成6年度渇水の気象・水文学的検証と渇水時のリスクマネジメントに関する研究」, pp.59-70, 1997.
- 4) 高棹琢馬, 宝馨, 清水章, J.A.Barriga: 琵琶湖流域の渇水持続特性について, 土木学会関西支部年講概要, pp.II-2-1 - II-2-4, 1986.
- 5) 宝馨, 今本博健, 林泰一, 中北英一, 市川温, 橋野典平, 中村行雄: 1998年那珂川流域における豪雨・洪水災害について, 京都大学防災研究所年報, 42, B-2, pp.235-253, 1999.
- 6) 国土地理院: 測量計算,
<http://vldb.gsi-mc.go.jp/sokuchi/surveycalc/main.html>.

(2000.10.2受付)