

一雨降水のパターン分析と時系列解析

柳澤吉保*¹・草刈智一*²・寒川典昭*³・山崎基弘*⁴

Pattern Classification Method and Time-Series Analysis for Each Consecutive Rainfall

YANAGISAWA Yoshiyasu, KUSAKARI Tomokazu, SOGAWA Noriaki
and YAMASAKI Motohiro

The flood by torrential rainfalls caused untold damage successively in many area of the nationwide in late years, which thought to be caused by a change of the rainfall characteristics. This fact will be expected to affect to the flood control-plan in the future. For this reason, it is necessary to study and clarify the change of the feature of the rainfalls. As one of the fundamental study for the nonstationary subject, this paper presents the analysis method for short term precipitation, which means a rainfall period from beginning to end of a consecutive rainfall, by using the Rainfall Pattern Graph. The Rainfall Pattern Graph is a expanded hyetograph that is reformed by standardizing the amount and the duration time of a rainfall. Following the above, this paper shows classification method for the distribution type of rainfall and also shows the time series changes of the rainfall pattern by applying the Rainfall Pattern Graph. As a result, it is shown that the rainfall patterns are able to classify into 5 types, and that the time series changes of the frequency of occurrence of each rainfall pattern is characterized at each 4 observation points respectively.

キーワード：一雨降水，降水パターングラフ，クラスター分析，パターン分析，時系列解析

1. はじめに

近年，短時間に大量の雨をもたらす記録的な豪雨が各地で相次いで発生している。そのため，従来の治水計画を超える豪雨が見受けられ，そのことが水害発生の原因の1つともなっている。その主な原因としては，人間活動によってもたらされる温室効果ガスの排出により地球温暖化が促進され，気候バランスが崩れ始めていることが指摘されている。

I P C C (Intergovernmental Panel on Climate Change：気候変動に関する政府間パネル)によると，大気や海洋における世界平均気温の上昇，世界平均海面水位の上昇が観測されており，地球全体が温暖化しているとの警告がなされている^{1),2)}。結果として，対流活動の活発化により，全体的に多くの地域で豪雨の発生する可能性が増大することが予想

されている。

さらに地球温暖化に加え各国の国土開発も水害に大きく影響していると考えられる。都市化の進行により地表面がアスファルトやコンクリートで被覆され，その結果，地面に浸透する雨量が減少するため，都市化する前に比べ雨水流出量が増大することになる。このことは，降水ピークから洪水ピークまでの時間を短縮させるとともに，洪水波形を尖鋭化させ洪水ピーク流量を増大させることにつながると考えられる。

また，地球温暖化の影響で年降水量などの長期間雨量については減少傾向にある一方，1時間降水などの短期間雨量については増加傾向にあることを指摘する研究もあり，このような雨の降り方の変化は土木の治水計画においても大きく影響を及ぼすことが懸念されている。

したがって，今後の治水計画を行ううえで気候変化に伴う非定常性^{3),4)}を前提としてより有用な治水対策を講じるために，雨の降り方の特徴を捉え，水害に及ぼす影響を解明する必要があると考える。

*1 環境都市工学科教授

*2 ジェイアール西日本コンサルタンツ株式会社

*3 信州大学工学部准教授

*4 信州大学工学部非常勤講師

原稿受付 2011年5月20日

このような現状に鑑み、本稿は非定常性が原因と考えられる雨の降り方の変化が治水計画に与える影響を考えていくための基礎研究として、降水の形態を捉えるための降水パターングラフを用いた分析・解析にかかる手法、および実データを適用した結果について述べるものである。

2. 基礎データ

2-1 対象地点

本稿で対象とする地点は、平成 11 年 (1999 年) 6 月に博多駅周辺で大きな被害を伴う水害をもたらされた福岡、同年 7 月新宿でビル地下への浸水被害があった東京、およびこれらの地点に加え大阪、長野を取り上げた。

各地点の観測機関、位置は表 1 に示すとおりである。

2-2 一雨降水データ

本研究では一連の一雨降水を対象とするため、まず始めに 2-1 に示した各対象地点の 1 時間降水量データ⁵⁾をもとに一雨降水データを取得することとした。なお、対象期間はアメダスで観測された 1 時間降水量のデジタルデータが整備されている 1976 年から 2006 年の 31 年間とした。

ここで、一雨降水についてその定義は文献によっても異なるが、「1 つの気象擾乱による降水が終わって、次の気象擾乱による降水が始まるまで」で、一般的に「6 時間以上の無降水状態が続かない場合」としている⁶⁾。また、筆者らが時間降水量データを処理した経験上から、本稿では「6 時間以上の無降水状態を伴わない一連の降水」をもって一雨降水とした。

ここでいう気象擾乱とは、大気中に出現し時間的に発達して最盛期に達しその後減衰する気象で、渦、対流、波動など大気の運動を伴う現象である。

このような方法で取得された一雨降水は、地点によっても異なるが各地点年間約 100 回程度発生している。紙面の都合上データの詳細は割愛するが、その総降水量、降水継続時間は様々で総降水量が 0.5mm 以下の降水から 400mm を超える降水もある。これらのうちほとんどの一雨降水の総降水量は 40mm 程度以下の小さな降水である。

治水の観点から考えると総降水量が多いデータを分析の対象とすることが望ましく、そのため、さらにこれらすべての一雨降水から総降水量の大きい上位降水を抽出して用いることとした。本研究では、上位降水として総降水量の大きい方から 50 位までの降水を対象とすることとした。対象とした東京、

長野、大阪、福岡の総降水量の 50 位データの値はそれぞれ 95mm, 52mm, 80mm, 114mm で 100mm 前後の降水であり、多雨降水を扱おうとする本稿の主旨からすれば、これら上位 50 位のデータでもって多雨降水の特徴を捉えるためのデータのおおよそが含まれているものと判断した。

表 2 には対象とした各地点における一雨降水データの諸元が示してある。一雨降水の総数は長野が最も多く 3565 回、東京が最も少なく 2884 回であり、4 地点の平均は約 3200 回である。観測期間が 31 年間であることから 1 年間に平均して約 100 回程度の一雨降水が生起していることになる。

さらに、分析の対象とした上位 50 個の一雨降水データについて個々にみても、総降水量の平均は 128.7mm、平均値の大きい方から福岡、東京、大阪、長野の順で、福岡における一雨降水の平均値は長野におけるその約 2.2 倍、また、最大値は福岡の 409.0mm、最小値は長野の 52.0mm となっており、一雨降水の総降水量は地点によって大きく差があることがわかる。

また、一雨降水の降水継続時間の平均時間は 31.3h で継続時間の平均の大きい順に福岡、東京、大阪、長野であり、総降水量の多い順と同じ順にな

表 1 対象地点

観測地点名	観測機関	位置
東京 (TKY)	東京管区気象台	東京都千代田区 大手町 1-3-4
長野 (NGN)	長野地方気象台	長野県長野市 箱清水 1-8-18
大阪 (OSK)	大阪管区気象台	大阪府大阪市中央区 大手前 4-1-76
福岡 (FUK)	福岡管区気象台	福岡県福岡市中央区 大濠 1-2-36

表 2 一雨降水データの諸元

観測地点	東京	長野	大阪	福岡	平均
①一雨降水総数 (回)	2884	3565	2902	3470	3205
②分析に用いるデータ数 (個)	50	50	50	50	50
③上位 50 位降水の総降水量 (mm)					
最大	282.5	140.5	300.0	409.0	283.0
最小	95.0	52.0	80.0	114.0	85.3
平均	153.7	75.7	117.8	167.5	128.7
④上位 50 位降水の降水継続時間 (h)					
最長	76	59	94	102	82.8
最短	3	7	7	5	5.5
平均	33.2	27.1	30.6	34.2	31.3
⑤上位 50 位降水の最大 1 時間降水量 (mm/h)					
最大	78.0	25.0	63.0	96.0	65.5
最小	7.5	4.0	8.0	8.5	7.0
平均	25.2	11.9	20.9	30.7	22.2

っている。最短時間は3～7hである。

さらに、最大1時間降水量の点では、平均は11.9～30.7mm/hであるが、最大値では長野の値が他の地点に比べて小さく、ここでも最大1時間降水量は大きい方から順に福岡、東京、大阪、長野となっている。

このように、総降水量、降水継続時間、最大1時間降水量いずれも福岡、東京、大阪、長野の順になり、一雨降水の特性は地域性と何らかの関連が示唆されるものであるが、この点に関しては本研究の目的と異なるため考察までにとどめておく。

ここで、各地点の最大1時間降水量の最小値に注目してみると、いずれの地点においても10mm/h未滿で平均7.0mm/hとなっており、この程度の1時間降水量は気象庁でも「弱い雨」と位置付けていることから、先に抽出した上位50位の一雨降水に災害に結びつく可能性のある一雨降水の多くが含まれていることを裏付けるものと考えられる。

3. 理論展開

3-1 降水パターングラフ

降水パターングラフは、一雨降水のハイトグラフを発展させたグラフで、降水形態をよりよく捉えるために降水継続時間と降水量をともに基準化して、それぞれを横軸、縦軸にとったグラフである。

横軸となる降水継続時間の基準化については、一雨降水の降水継続時間を均等に n 分割し、それぞれ(降水継続時間/ n)の時間幅をもつ「時間バンドX1～Xn」を設定する。一方、縦軸となる降水量の基準化については、各時間バンドX1～Xnに入る降水量の合計を各一雨降水の総降水量で除して得られる値を「降水量比率」と定義して縦軸に与えている。

上記の手法により、降水継続時間および降水量の絶対値に影響されず、降水形態のパターンを一般化した「降水パターングラフ」を作成することができる。このグラフを用いることにより、降水継続時間や総降水量がそれぞれ異なる一雨降水に対して、どの時間バンドに降水が集中しているのかなどの比較・分析をより容易にすることが可能になる。

本研究では、「降水パターングラフ」を作成するうえで時間バンドの分割数を $n=5$ とした「5分割降水パターングラフ」を用いてその後の分析を行うこととした。ここで分割数を5としたのは、他の分割数に比べ $n=5$ とした場合の降水パターングラフが、ハイトグラフの形状をよく捉えていることが研究の過程において経験上得られたためである。具

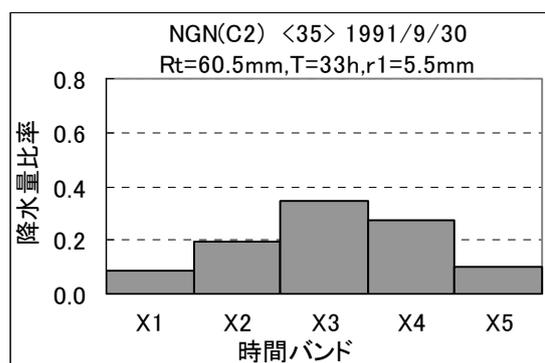


図1 降水パターングラフの一例

(1991年9月30日 長野市)

体に述べると、仮に n を小さくして $n=3$ とした場合前半、中盤、後半の分割になり、例えば降水継続時間を平均値の30時間とすれば各時間バンド幅が10時間とかなり長くなりハイトグラフの特徴を捉えることが困難となる。一方、 $n=10$ のように多くとった場合、集中豪雨のような降水継続時間の短いものが異なる時間バンドに分割されるため、この場合もハイトグラフの形状の特徴を捉えづらくなり、降水パターングラフを用いて比較、分析するうえで不都合が生じる。そこで、時間バンドを5～6分割に絞って検討した結果、5分割とした場合が最もハイトグラフの特徴を捉えていると判断した。

このようにして作成された一雨降水の降水パターングラフの一例を図1に示す。この例は観測地点が長野、総降水量60.5mm、降水継続時間33時間の1991年9月30日のデータを用いたものである。時間バンドX1～X5はそれぞれ $33 \div 5 = 6.6$ 時間、各時間バンドの降水量比率はそれぞれ0.09, 0.20, 0.33, 0.28, 0.10で縦軸に表されている。

図中に示す記号は以下のとおりであり、以降に示す降水パターングラフについても同様に表記する。

記号：観測地点 (NGN=長野)

C : クラスター番号

< > : 一雨降水の上位順番号

yyyy/mm/dd : 一雨降水の発生日 (始まった日)

Rt : 総降水量

T : 降水継続時間

r1 : 一雨降水中の最大1時間降水量

3-2 クラスター分析

3-2-1 クラスター分析法

クラスター分析は、異質なものが混ざり合っている対象を、それらの間に何らかの意味で定義された

類似度を手がかりとして似たものを集め、いくつかの均質的なものの集合（クラスター）に分類する方法を総称したものである。この対象は個体のものもあれば本研究のように変数とする場合もある。

クラスター分析の方法は大別して階層的方法と非階層的方法があるが、本研究ではクラスター数を予め決定せず対象の階層的構造およびその結果としてのデンドログラム（樹形図）が得られる階層的方法を適用して分析することとする。

階層的クラスター分析ではおおよそ以下に示す3つのステップを繰り返すことによって、階層構造とクラスター間の距離を表すデンドログラム（樹形図）を得ることができる。

ステップ1 : 1つずつの対象を構成単位とする n 個のクラスターから出発する。（ $n=50$ ）

ステップ2 : クラスター間の類似度を算出し、最も類似度の高い2つのクラスターを統合して1つのクラスターとする。

ステップ3 : クラスター数が1つの場合はそこで終了。そうでない場合はステップ2に戻る。

これにより得られたデンドログラムを、任意の高さで切ることによって任意の数のクラスターに分割することができる。しかしながら、分割するクラスター数を決めるにあたって、最適なクラスター数を一意的に決定する方法は確立されておらず、得られたデンドログラムから経験的にクラスター数を決定する方法が用いられている。したがって、本稿においても得られたデンドログラムをもとにクラスターを分割することとする。

3-2-2 類似度の評価方法

個体（測定値）間の類似度の定義にはユークリッド距離、ミンコフスキー距離、マハラビノスの距離などがあり、また、クラスター間の類似度の定義には、最短距離法、最長距離法、重心法、メディアン法、ウォード法などいくつかの方法がある。そこで、それぞれの手法を組み合わせでデンドログラムを求めた結果、最もデンドログラムのバランスがとれている組合せとして、本研究においては個体間の類似度およびクラスター間の類似度の算出方法として、それぞれ「ユークリッド距離」および「ウォード法」を用いることとした。

ここで、「ユークリッド距離」は多次元空間の幾何的な距離をもって個体間の類似度を算出する方法で、直感的で取り扱いも容易なこと、また、「ウォード法」は分類感度がよく、他の方法に比べて安定した結果が

得られる方法であることから、ともに多く用いられている方法であることを付言しておく。

3-2-3 個体間の類似度

個体間の類似度は先にも述べたようにユークリッド距離を用いて評価する。

各個体間のユークリッド距離の算出方法は以下のとおりである。

1つの個体が m 個の変量からなる n 個の個体について、測定値 x_{ji} ($i=1, \dots, n$ [=個体数], $j=1, \dots, m$ [=変量数]) が間隔尺度で得られる場合、個体 x_i と個体 $x_{i'}$ のユークリッド距離 $d_{ii'}$ は式(1)で定義される⁷⁾。

$$d_{ii'} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ji} - x_{ji'})^2} \quad (1)$$

本稿では、任意の1つの降水パターングラフを1個体とし、降水パターングラフのもつ情報である各時間バンドの降水量比率 r_n ($X = Xn; n=1, \dots, 5$) を個体の変量として、式(1)によりユークリッド距離を求める。したがって、ここでは時間バンドを5分割とした50個の降水パターングラフについて分析をおこなうので、個体数 $n=50$ 、変量数 $m=5$ となる。

3-2-4 クラスター間の類似度

クラスター間の類似度の評価はウォード法によることとする。ウォード法は各段階におけるクラスターの対のうち、クラスターを統合することによる平方和の増分が最少となるクラスターをの組を統合する方法である。

いま、 x_{ipj} 、 x_{iqj} 、 x_{irj} をクラスター(p)、クラスター(q)、クラスター(r)に属する j 番目の対象の第 i 変量についての測定値とする。そしてクラスター(p)とクラスター(q)を統合して新しくできるクラスターをクラスター(t)、またクラスター(t)とは別の任意のクラスターをクラスター(r)とし、それぞれのクラスターの大きさ（クラスターに含まれる対象の数）を n_p, n_q, n_t, n_r とするとき、クラスター(t)とクラスター(r)の類似度は

$$\Delta S_{ir} = \frac{n_p + n_r}{n_t + n_r} \Delta S_{pr} + \frac{n_q + n_r}{n_t + n_r} \Delta S_{qr} - \frac{n_r}{n_t + n_r} \Delta S_{pq} \quad (2)$$

で表される⁷⁾。ここに $n_t = n_p + n_q$ である。

ここで、

$$\Delta S_{pr} = \frac{n_p n_r}{n_p + n_r} \sum_{i=1}^m (\bar{x}_{ip.} - \bar{x}_{ir.})^2 \quad (3 a)$$

$$\Delta S_{qr} = \frac{n_q n_r}{n_q + n_r} \sum_{i=1}^m (\bar{x}_{iq.} - \bar{x}_{ir.})^2 \quad (3 b)$$

$$\Delta S_{pq} = \frac{n_p n_q}{n_p + n_q} \sum_{i=1}^m (\bar{x}_{ip.} - \bar{x}_{iq.})^2 \quad (3 c)$$

$$\bar{x}_{ip.} = \sum_{j=1}^{n_p} x_{ipj} / n_p \quad (4 a)$$

$$\bar{x}_{iq.} = \sum_{j=1}^{n_q} x_{iqj} / n_q \quad (4 b)$$

$$\bar{x}_{ir.} = \sum_{j=1}^{n_r} x_{irj} / n_r \quad (4 c)$$

である。

4. 実データの適用による 降水パターンの分析

4-1 クラスタ分析

2-1 で示したそれぞれの対象地点(東京, 長野, 大阪, 福岡)について, 実データを適用して作成された降水パターングラフについて一雨降水のパターンの分析をおこなう。

なお, デンドログラムの図中に示す番号は各対象地点の一雨降水の番号に対応しており, 総降水量の多いものから順に1, 2...50としている。また, 総降水量が同じものについては降水継続時間の短い方を上位とした。

以下に, 各対象地点において上記の手法を用いて分類を行い, それぞれの地点における降水パターンの特徴について考察する。

(1) 東京

東京で観測されたデータ(表3)を適用して作成された降水パターングラフについて, クラスタ分析して得られたデンドログラムおよびクラスタ分類した結果を図2に示す。分類したクラスタの名称はデンドログラムの左側から順に第1クラスタ, 第2クラスタ, ...とした。また, 図3に各クラスタに分類された降水パターングラフの代表グラフを示す。

以下にそれぞれのクラスタにおける特徴を考察する。

表3 分析対象データ(東京)

番号	年月日	総降水量 (mm)	継続時間 (h)	番号	年月日	総降水量 (mm)	継続時間 (h)
1	2004/10/8	282.5	31.0	26	1993/11/13	134.5	24.0
2	2003/8/14	279.0	76.0	27	1983/9/27	134.0	47.0
3	1996/9/22	259.5	17.0	28	1979/10/6	129.0	37.0
4	1991/9/18	238.5	40.0	29	1990/8/9	126.5	29.0
5	1993/8/27	234.5	14.0	30	1990/9/30	123.5	20.0
6	1982/9/10	226.0	55.0	31	1991/10/10	123.0	40.0
7	1989/7/31	219.5	32.0	32	1996/9/15	123.0	14.0
8	1981/10/22	218.0	18.0	33	1999/8/13	122.5	21.0
9	2004/10/19	214.5	48.0	34	1997/8/23	116.0	10.0
10	1986/8/4	214.0	27.0	35	1985/6/18	115.0	44.0
11	1988/8/10	202.0	46.0	36	2002/9/6	114.0	31.0
12	1999/7/12	191.0	35.0	37	2000/7/4	112.0	3.0
13	2004/10/3	188.5	72.0	38	1997/5/24	110.5	17.0
14	2001/10/10	186.5	23.0	39	2003/9/20	110.0	37.0
15	2000/7/7	185.0	18.0	40	1977/9/18	106.0	26.0
16	2006/12/26	177.0	24.0	41	1993/7/24	105.5	34.0
17	1996/7/8	175.0	58.0	42	1977/8/13	105.0	33.0
18	1990/11/28	159.5	66.0	43	2005/8/25	102.0	26.0
19	2001/9/9	158.0	54.0	44	1991/9/8	101.0	37.0
20	2006/10/5	152.5	41.0	45	1991/9/30	100.5	30.0
21	1985/6/29	150.0	35.0	46	1986/5/14	100.0	12.0
22	1995/9/16	148.0	32.0	47	1991/10/6	99.5	47.0
23	1979/10/18	147.0	27.0	48	1989/9/19	98.0	17.0
24	1992/10/8	139.5	15.0	49	1999/4/23	97.0	42.0
25	1992/11/19	134.5	36.0	50	1977/9/8	95.0	41.0

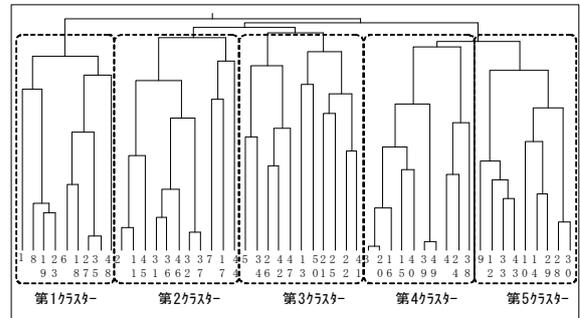


図2 クラスタ分析によるデンドログラム(東京)

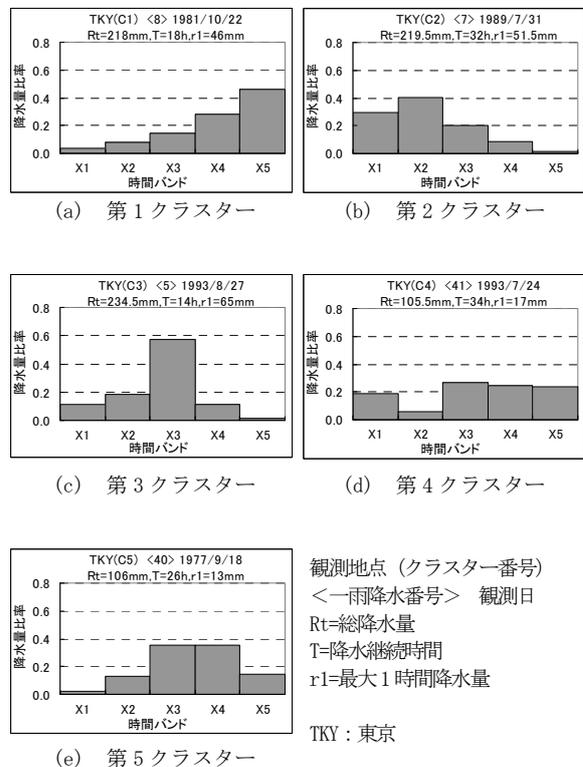


図3 各クラスタの代表グラフ(東京)

観測地点(クラスタ番号)
<一雨降水番号> 観測日
Rt=総降水量
T=降水継続時間
r1=最大1時間降水量

TKY: 東京

(a) 第1クラスター (個体数9個)

X1 から徐々に降水量比率が大きくなり X5 で最大となる特徴を有するパターングラフからなるクラスターで後半型の降水パターンである。

(b) 第2クラスター (個体数11個)。

主に X2 が最大となり、徐々に減少しているが、全体としては前半に降水が集中している前半型のパターンとして捉えることができる。

(c) 第3クラスター (個体数5個)

X3 の時間バンドが他の時間バンドに比べて集中しており、集中型の降水パターンからなるクラスターである。

(d) 第4クラスター (個体数6個)

それぞれの時間バンド間の降水量比率の差が少なく、各時間バンドをとおして同程度の降水が続くパターンで平均型の降水パターンからなるクラスターである。

(e) 第5クラスター (個体数19個)

分類された降水パターングラフの数が最も多いクラスターで、正規分布型の降水パターンである。前出の第3クラスターとよく似た形状をしているが、降水パターングラフの個々を見た場合、第3クラスターではピーク時間バンドにおける降水量比率が著しく大きくなっているのに対し、このクラスターではピーク時間バンドでの降水量比率がそれほど大きくないため第3クラスターとは別の特徴を持つパターンとして分類した。

(2) 長野

長野で観測されたデータ (表4) を適用して作成した降水パターングラフについて、クラスター分析して得られたデンドログラムおよびクラスター分類した結果を図4に示す。分類したクラスターの名称は(1)と同様にデンドログラムの左側から順に第1クラスター、第2クラスター、・・・とした。また、図5に各クラスターに分類された降水パターングラフの代表グラフを示す。

以下にそれぞれのクラスターにおける特徴を考察する。

(a) 第1クラスター (個体数8個)

特定の1つの時間バンドに降水が集中するパターンで、集中型のパターンからなるクラスターである。

(b) 第2クラスター (個体数15個)。

第3クラスターとともにクラスター内の降水パターングラフの数が最も多いパターンである。X3 の時間バンドの降水量比率が最も大きく、X3 を中心に正規分布のような形状をしており、正規分布型の降水パターンからなるクラスターである。

表4 分析対象データ (長野)

番号	年月日	総降水量 (mm)	継続時間 (h)	番号	年月日	総降水量 (mm)	継続時間 (h)
1	2004/10/19	140.5	42.0	26	1988/7/27	67.0	15.0
2	1982/9/11	140.0	47.0	27	1995/9/16	67.0	40.0
3	1983/9/27	133.0	42.0	28	2001/9/9	66.5	41.0
4	1996/6/24	122.0	42.0	29	1988/6/2	66.0	38.0
5	1981/8/22	117.0	18.0	30	1997/8/7	66.0	17.0
6	2006/7/18	112.0	32.0	31	1983/5/16	64.0	25.0
7	1995/7/11	98.0	29.0	32	2006/9/6	63.5	11.0
8	1981/7/2	93.0	32.0	33	2002/10/1	62.0	21.0
9	1998/7/9	90.5	29.0	34	1999/9/21	61.0	16.0
10	1985/6/24	90.0	13.0	35	1991/9/30	60.5	33.0
11	1976/9/8	89.0	29.0	36	1984/7/17	60.0	27.0
12	1985/6/29	88.0	32.0	37	1985/9/23	60.0	43.0
13	2002/7/10	84.5	24.0	38	1999/6/29	60.0	19.0
14	1989/9/19	83.5	21.0	39	2006/12/26	60.0	28.0
15	2000/9/11	82.5	29.0	40	1985/7/20	59.0	9.0
16	1979/8/21	79.0	26.0	41	2001/6/13	58.5	59.0
17	1999/9/14	79.0	25.0	42	1995/7/8	58.0	13.0
18	2006/9/12	74.5	51.0	43	2006/7/16	56.5	37.0
19	1988/9/24	74.0	35.0	44	2004/9/5	56.0	17.0
20	1998/9/15	71.5	12.0	45	1998/10/16	55.5	28.0
21	1999/10/27	71.5	27.0	46	1995/8/30	55.0	24.0
22	2004/10/8	71.0	29.0	47	2005/9/4	53.5	34.0
23	1976/7/19	70.0	15.0	48	2005/8/2	52.5	7.0
24	1999/8/14	69.5	23.0	49	1978/10/28	52.0	28.0
25	1986/9/2	68.0	11.0	50	1984/7/25	52.0	9.0

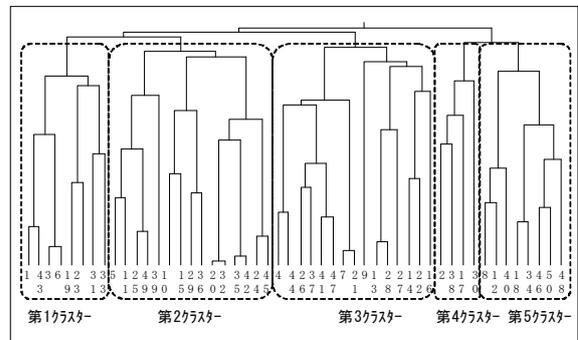


図4 クラスター分析によるデンドログラム (長野)

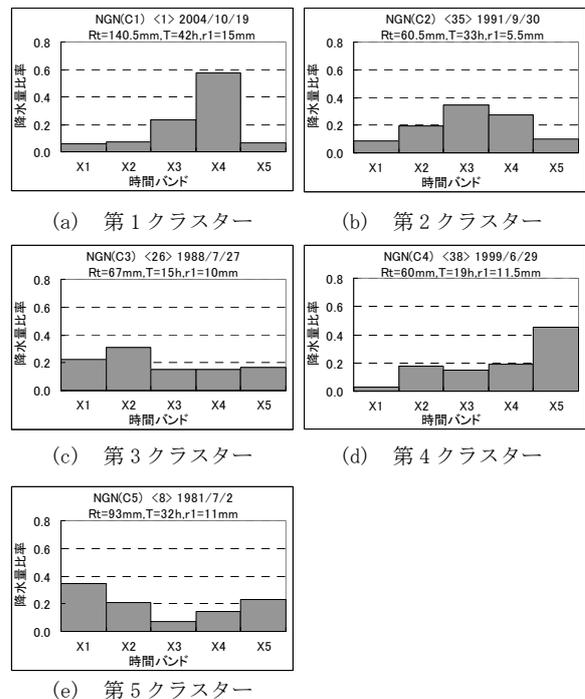


図5 各クラスターの代表グラフ (長野)

(c) 第3クラスター (個体数 15 個)

X1~X5 の各時間バンドにおける降水量比率の差が他のクラスターと比べて小さく、各時間バンドを通じて同程度の降水が続くタイプで平均型の降水パターンからなるクラスターである。

(d) 第4クラスター (個体数 4 個)

X1 から X5 にかけて徐々に降水量比率が大きくなる傾向があり、時間バンド X5 において最大となっている。後半型の降水パターンからなるクラスターである。

⑤ 第5クラスター (個体数 8 個)

時間バンド X1 および X5 の降水量比率が大きく、一方、時間バンド X2, X3 の降水量比率が小さくなっており、凹型の形状をした中盤減少型の降水パターンからなるクラスターである。

この特徴を有する降水パターンは、今回対象とした他の地点ではみられず、長野における特徴的な降水パターンである。

(3) 大阪

大阪で観測されたデータ (表 5) を適用して作成した降水パターングラフについて、クラスター分析して得られたデンドログラムおよびクラスター分類した結果を図 6 に示す。分類したクラスターの名称は前出と同様とした。また、図 7 に各クラスターに分類された降水パターングラフの代表グラフを示す。

以下にそれぞれのクラスターにおける特徴を考察する。

(a) 第1クラスター (個体数 11 個)

X1 の降水量比率が最も大きくなっており、徐々に段階的に減少していくパターンで、前半型の降水パターンからなるクラスターである。

(b) 第2クラスター (個体数 7 個)

X1, X2 の降水量比率が小さく、X4, X5 の降水量比率が大きくなっていることから後半型の降水パターンからなるクラスターである。

(c) 第3クラスター (個体数 10 個)

各時間バンドのうち、ある 1 つの時間バンドの降水量比率が顕著に大きくなっている。降水量比率が大きくなる時間バンドの位置は降水パターングラフによって異なっているが、集中型の特徴をもつ降水パターンからなるクラスターである。

(d) 第4クラスター (個体数 12 個)

分類された降水パターングラフの数が最も多いクラスターで、X2 から X4 にかけての降水量比率が大きく正規分布型とも捉えられるが、ピークを示す時間バンドにおける降水量比率がそれほど大きくないことから正規分布型ではなく平均型の降水パターン

表 5 分析対象データ (大阪)

番号	年月日	総降水量 (mm)	継続時間 (h)	番号	年月日	総降水量 (mm)	継続時間 (h)
1	1995/7/2	300.0	94.0	26	1984/6/8	101.0	15.0
2	1989/9/2	220.5	32.0	27	2001/9/6	100.5	25.0
3	2004/10/19	219.5	42.0	28	1986/6/20	99.5	26.0
4	1976/9/8	215.0	61.0	29	1980/10/18	97.0	22.0
5	2000/9/11	180.0	41.0	30	1989/9/19	97.0	16.0
6	1983/9/27	177.0	33.0	31	1993/9/29	93.5	26.0
7	1990/9/13	150.5	9.0	32	1985/6/25	93.0	21.0
8	1988/6/2	149.0	44.0	33	1984/6/26	91.0	12.0
9	1998/10/16	139.5	44.0	34	1992/10/8	90.5	25.0
10	1999/6/29	139.5	29.0	35	1986/5/19	89.0	24.0
11	2003/8/14	138.0	33.0	36	1993/7/2	88.5	32.0
12	1995/5/11	135.5	31.0	37	1999/6/24	88.0	45.0
13	2006/7/17	135.0	50.0	38	1982/8/2	87.0	12.0
14	1979/6/28	128.0	29.0	39	1990/7/2	87.0	51.0
15	1999/8/10	127.5	20.0	40	1998/5/28	87.0	38.0
16	1982/8/1	122.0	25.0	41	1985/4/30	86.5	39.0
17	1993/7/4	119.5	16.0	42	1978/6/23	85.0	23.0
18	1983/6/20	118.0	26.0	43	1991/11/27	84.5	36.0
19	1979/9/30	114.0	7.0	44	1980/8/28	83.0	21.0
20	1979/6/27	113.0	21.0	45	1991/9/30	82.5	22.0
21	2006/7/20	111.5	31.0	46	1988/6/23	81.0	40.0
22	1998/6/21	111.0	25.0	47	2000/11/1	81.0	19.0
23	1987/5/13	105.0	27.0	48	2005/7/3	81.0	40.0
24	1991/6/2	103.0	50.0	49	1990/7/12	80.5	7.0
25	1993/6/28	102.0	61.0	50	1998/5/16	80.0	14.0

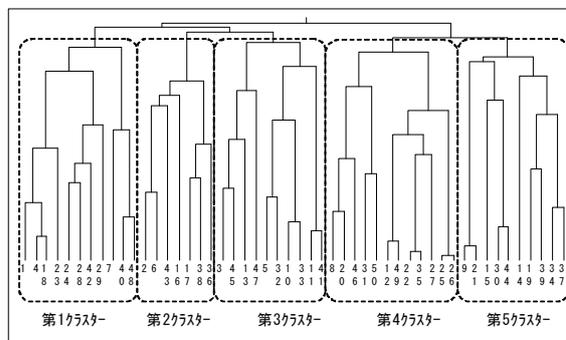


図 6 クラスター分析によるデンドログラム (大阪)

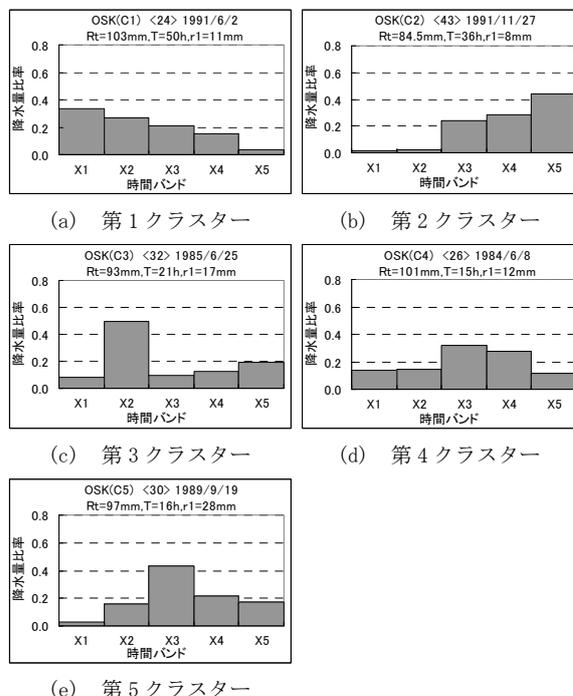


図 7 各クラスターの代表グラフ (大阪)

として捉えられる。

(e) 第5クラスター (個体数10個)

時間バンドX3において降水量比率が最も大きく、その時間バンドを中心に正規分布のような形状となっており、正規分布型の降水パターンからなるクラスターである。

(4) 福岡

福岡で観測されたデータ(表6)を適用して作成した降水パターングラフについて、クラスター分析して得られたデンドログラムおよびクラスター分類した結果を図8に示す。分類したクラスターの名称は前出と同様とした。また、図9に各クラスターに分類された降水パターングラフの代表グラフを示す。

以下にそれぞれのクラスターにおける特徴を考察する。

(a) 第1クラスター (個体数11個)

X1~X5の各時間バンドにおける降水量比率の差が他のクラスターと比べて小さく、各時間バンドで平均的に降水が続くパターンで平均型の降水パターンからなるクラスターである。

(b) 第2クラスター (個体数9個)。

主にX4およびX5の時間バンドに全降水の6~8割が集中しているパターンで、後半型の降水パターンからなるクラスターである。

(c) 第3クラスター (個体数2個)

分類された降水パターングラフの数が少なく他のクラスターと統合することも考えられるが、他のクラスターとは異なる特徴があるため敢えて統合しないこととする。

図9(c)に示す例では全降水量の大部分がX5に集中しているが、他のグラフにおいてもいずれかの時間バンドに集中するパターンであり集中型のパターンのクラスターである。

(d) 第4クラスター (個体数15個)

全クラスターの中で分類された降水パターングラフの数が最も多いクラスターである。X3の時間バンドの降水量比率が大きい降水パターンで正規分布型の降水パターンからなるクラスターである。

(e) 第5クラスター (個体数13個)

X1からX3の時間バンドにかけて降水が集中し、それ以降の時間バンドで徐々に小さくなっている。第5クラスターは前半型の降水パターンからなるクラスターである。

4-2 降水パターンの時系列解析

本章では対象地点ごとに降水パターンの発生頻度が経年的にどのように変化しているかについて考察する。

表6 分析対象データ (福岡)

番号	年月日	総降水量 (mm)	継続時間 (h)	番号	年月日	総降水量 (mm)	継続時間 (h)
1	1980/8/28	409.0	56.0	26	1983/7/4	144.0	15.0
2	1995/7/2	386.0	101.0	27	1994/9/16	143.0	17.0
3	1985/6/26	287.0	66.0	28	1980/7/10	140.0	19.0
4	1983/7/15	271.0	43.0	29	1982/7/23	140.0	38.0
5	1997/7/6	246.5	102.0	30	1997/6/27	140.0	24.0
6	1979/6/28	244.0	51.0	31	1995/5/13	138.0	25.0
7	2001/6/19	231.0	26.0	32	2004/10/18	138.0	50.0
8	1985/6/24	213.0	25.0	33	1986/7/14	137.0	15.0
9	1980/7/8	206.0	32.0	34	1989/9/1	136.0	28.0
10	1979/6/26	197.0	30.0	35	2006/8/18	132.5	32.0
11	1987/7/18	197.0	36.0	36	1995/9/23	132.0	32.0
12	1991/6/9	189.0	14.0	37	2001/6/22	132.0	48.0
13	1982/7/12	174.0	36.0	38	1981/6/25	130.0	29.0
14	1978/6/10	168.0	18.0	39	2004/6/25	128.0	35.0
15	2006/7/19	168.0	42.0	40	2001/7/5	127.5	29.0
16	2002/9/16	167.0	21.0	41	1990/6/14	125.5	32.0
17	1996/6/19	166.0	45.0	42	2000/10/31	124.5	42.0
18	1988/6/1	164.0	39.0	43	1982/8/22	122.0	15.0
19	1998/5/10	162.5	53.0	44	1980/6/30	118.0	23.0
20	1999/6/28	159.5	19.0	45	1993/4/28	117.5	28.0
21	2006/6/22	153.5	25.0	46	1991/7/4	117.0	30.0
22	1980/9/10	150.0	48.0	47	1997/7/28	117.0	5.0
23	1997/9/6	150.0	29.0	48	1989/9/18	115.5	21.0
24	1993/8/18	145.5	34.0	49	1981/6/29	115.0	36.0
25	1997/8/11	145.0	27.0	50	1987/6/8	114.0	25.0

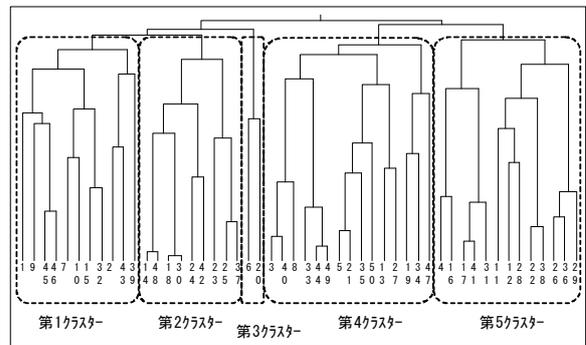


図8 クラスター分析によるデンドログラム (福岡)

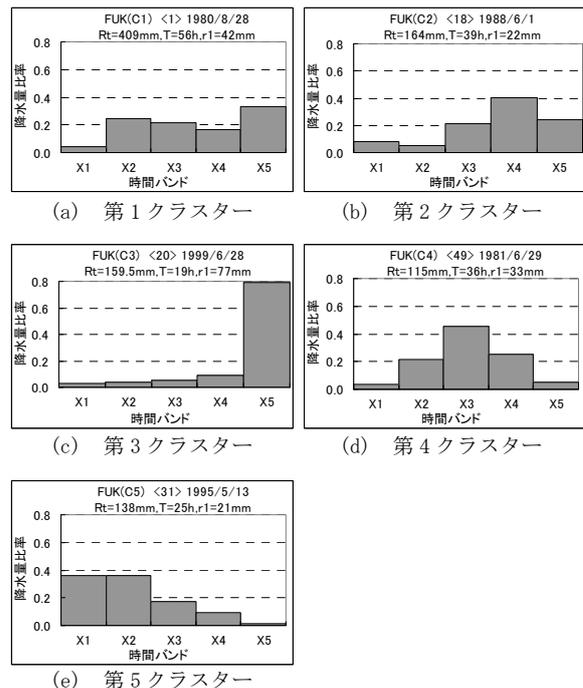


図9 各クラスターの代表グラフ (福岡)

本研究においては地点ごとのデータを 50 個とし、結果としてさらに 5 つのクラスターに分類することとなったため、各クラスター（パターン）に含まれるグラフ数がせいぜい 10 個程度になり時系列変化の特徴が捉えづらいものになっている。

そこで、データ範囲の 31 年（1976～2006 年）を 10 年間程度ごとに分割し、その中で各パターンの発生頻度がどのように変化しているかを考察することとする。ここでは、それぞれの期間を 1976 年-1986 年（11 年間）、1987 年-1996 年（10 年間）、1997 年-2006 年（10 年間）に分割した。

図 10 は各対象地点において 10 年程度ごとに分割した場合の、降水パターンの発生頻度の変化を示している。それぞれの地点について以下のような特徴を捉えることができる。

(1) 東京

東京における降水パターンの時系列変化を図 10 (a) に示しているが、東京の場合、上位 50 位に入る一雨降水は 1976-1986 年の 11 年間に比べて 1987 年以降の各 10 年では約 1.6 倍発生していることがグラフから見てとれる。

また、各クラスターについてはクラスター 1 が減少傾向で、またクラスター 2, 3, 4 は中盤 10 年間で増加しているものの最近 10 年間ではその直前の 10 年間に比べて減少している。一方、クラスター 5 は時系列順に増加していることがわかる。

各クラスターの降水パターンの特徴と重ねてみた場合、後半型は減少傾向、前半型、集中型および平均型のパターンは 1987-1996 年の 10 年間で増加しているものの、近年 10 年間では減少傾向にある。また、クラスター 5 に分類された正規分布型の降水タイプは増加傾向にあることがわかる。

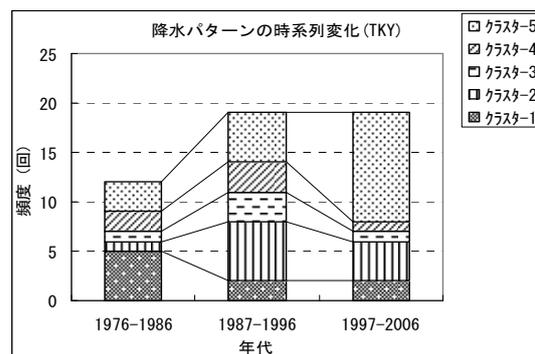
(2) 長野

図 10 (b) は長野における降水パターンの時系列変化を示している。

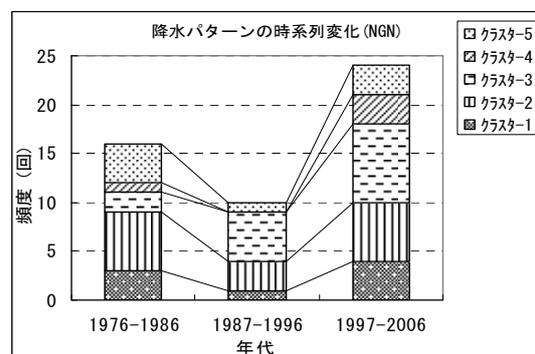
長野の場合、上位 50 位に入る一雨降水は 1987-1996 年の 10 年間ではその前後の各 10 年程度に比べて発生頻度が少なくなっているが、1997-2006 年の発生頻度は 1976-1986 年の 11 年間に比べて約 1.5 倍となっている。

また、各クラスター別の発生頻度は、クラスター 3 を除くクラスターではいずれも 1987-1996 年の期間で減少しているが、これはこの期間における一雨降水の発生頻度自体が前後の 10 年程度に比べて低いことが影響していると考えられる。

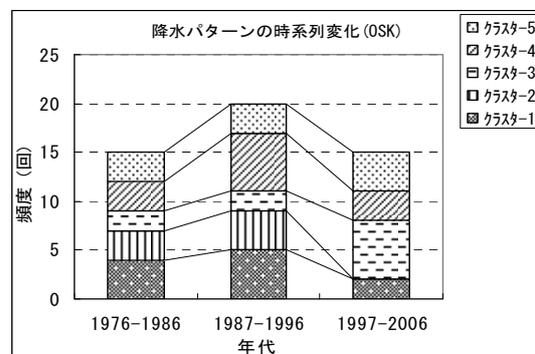
また、1976-1986 年と 1997-2006 年を比較した場合大きくは増減していないことから、特に時系列的



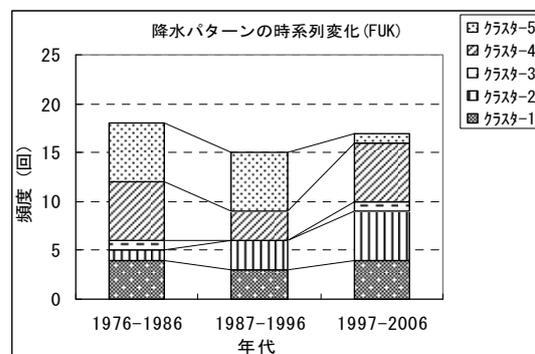
(a) 東京



(b) 長野



(c) 大阪



(d) 福岡

図 10 降水パターンの時系列変化

な変化を示すものではないと判断できる。一方、クラスター3は年代ごとに増加しており、特に一雨降水の総数が減少している1986-1996年においても増加していることから、近年の増加傾向を示すものと考えられる。

降水パターンの特徴の点では、長野においてはクラスター3の示す平均型の降水パターンが増加していることになる。

(3) 大阪

大阪の場合、1987-1996年の10年間ではその前後の各10年程度と比べて発生頻度が多く、1976-1986年および1997-2006年の発生回数は同数である。

各クラスター別の発生頻度は、クラスター1、クラスター2、クラスター4は一雨降水発生回数に対応して1987-1996年の期間で多くなっているものの、近年の10年間では再び減少している。一方、クラスター3は前半の21年間に比べて最近の10年間で大きく増加しているほか、クラスター5についても前半の21年間に比べて最近の10年間で増加していることがわかる。

これを、降水パターンの特徴にあてはめると、クラスター3の集中型、またクラスター5の正規分布型の降水パターンが増加傾向にあることになる。

(4) 福岡

福岡の場合、一雨降水の発生頻度は1987-1996年でやや少なくなっているが、各年代において15~18回で頻度的には大きな変化はない。

クラスター別にみると、クラスター1、クラスター3、クラスター4は発生回数と対応して1987-1996年で少なくなっている。近年になって増加しているのはクラスター2とクラスター4で、クラスター2は年々増加する傾向があり、クラスター4は一度減少しているものの最終的には増加する結果となっている。これに対してクラスター5は最近の10年間で大きく減少している。

これを降水パターンの特徴にあてはめると、まずクラスター1の平均型降水には時系列的な変化はあまり見られない。一方、クラスター2のように後半に降水が集中するパターンが増加する傾向があるのに対して、クラスター5のように前半に降水が集中するパターンは減少する傾向があるといえる。つまり、福岡においては一雨降水における時間バンドのピーク位置に変化が見られ、前半に集中していた降水が次第に後半に集中するように変化していることがわかる。

5. まとめ

本稿は非定常解析の基礎研究として、降雨災害の発生に影響を与えていると考えられる雨の降り方の経年変化について、東京、長野、大阪、福岡の4地点を対象に、1976-2006年の31年間における上位50位の一雨降水について降水パターン分析および時系列解析をおこない、地点ごとにどのような特徴がみられるかを考察したものである。

その過程においては、それぞれの一雨降水を客観的に比較・分析することを目的に、降水量や降水継続時間の絶対量によらない「降水パターングラフ」を提案するとともに、「降水パターングラフ」をクラスター分析により分類する手法を試みている。

降水パターン分析の結果、今回対象とした4地点の一雨降水においては、各地点それぞれ5つのクラスターに分類でき、分類されたクラスターに含まれる降水パターンは前半型、正規分布型、後半型、平均型、集中型、中盤減少型の特徴があること、また、地点によって抽出される降水パターンが異なっていることが示された。さらに、それらの降水パターン発生頻度の経年変化についても地点ごとに特徴があることが示された。

本稿では実データとして4つの観測地点を取り上げて適用しているが、任意の地点への適用も可能な手法であることから、発生する降水パターンの型およびそれらの経年変化について、地域性や地形的特性を考慮した空間的な把握にも応用できるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) IPCC: Technical Summary, A report accepted by Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007, pp35-40
- 2) 前出1), pp44-51
- 3) 竹内邦良: 米連邦関係機関共催「非定常性、水文頻度解析、水マネジメント」ワークショップ参加報告, 河川, 2010-2月号, pp. 99-96
- 4) P.C.D.Milly et al: Stationarity is dead: Whither water management?, SCIENCE, Vol.319(2008), pp.573-574
- 5) 気象庁, 気象統計情報, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, 2009年5月15日
- 6) 菊池渉: 北海道内の豪雨傾向の地域・経年特性について, 平成20年度北海道開発技術研究発表会, 安-22, 平成21年2月26日.
- 7) 例えば, 田中豊・脇本和昌: 多変量統計解析法, 現代数学社, 1983, pp. 230-244