

## 降雨成因を考慮した降雨の時空間分布特性の統計的解析

矢島 啓・池淵 周一

### A STATISTICAL ANALYSIS OF TIME AND SPACE DISTRIBUTION OF RAINFALL CONSIDERING ITS METEOROLOGICAL TYPE

By *Hiroshi YAJIMA* and *Shuichi IKEBUCHI*

#### Synopsis

Recently in Japan, especially in very urbanized area, a small or middle size river (the catchment size is about less than 200 km<sup>2</sup>) is confronted with the danger of flooding because of its short run-off time and high run-off ratio. But in river planning, it is not so easy to deal with these rivers. This is mainly due to two reasons; (1) run-off mechanism in urbanized area is very complicated because of the sewerage system (2) heavy rainfall sometimes occurs in small area and short time, so the characteristic of time and space distribution of rainfall is not well known.

In this paper we study about the the time and space distribution of rainfall in urbanized area around Osaka using the data of rader raingage. We first categorize rainfall data into four types; typhoon, frontal, low and thunder rainfalls. Then for each rainfall type we analyze the DAD (duration, area and depth) of rainfall and calculate the orientation of rainfall field and shape ratio (the ratio of major axis to minor axis) assumig the shape is an ellipse. And we also apply the cluster analysis to divide rainfalls into a few typical types of group using the result of DAD analysis.

#### 1. 序 論

近年、都市域における中小河川（以下、「都市河川」）では、流域の都市化の進展にともない、流出時間の短縮、ピーク流出量の増大等の問題が生じている。また、都市河川の流域面積は全国的にみて 50 km<sup>2</sup> 以下の小規模なものが全体の 80% 以上を占めているため<sup>1)</sup>、局所的な豪雨に対しても溢水の危険性が増大している。このような状況のなか、都市河川の治水計画の重要度が、今後ますます高まっていくと思われる。しかしながら、現在、計画に用いられる降雨すなわち計画降雨の取り扱いかたは十分であるとは言えない。これは、都市河川で用いられている計画降雨が、基本的には大河川で用いられているものと同じであり、降雨場の時間的、空間的な局所性を十分反映できるような形とはなっていないからである<sup>1)2)</sup>。

例えば、河川の計画規模は通常、降雨の生起確率をもって評価され、数年に一度の生起確率、雨量で評価すると 50 mm/hr 程度の計画規模を持つ都市河川が多い。ここで用いられる確率評価された雨量は、雨量観測所ごとに確率処理が行われるため、観測所間の降雨量の同時生起確率については評価できない。また、都市河川は流域面積が小さいため、1地点の代表雨量観測所での確率雨量をもって計画がなされることも少なくない。この場合、1つの確率雨量が得られたときに、降雨の時間的・空間的な広がりに関する情報がないため、それらを再現する計画降雨モデルを作成することはできない。このような問題を解決するためには、

降雨の地点雨量の評価を行うのではなく、降雨が生じている全体の場を時間的・空間的にとらえる必要がある。

これまでの降雨の時空間分布に関する研究は、降雨場を事例解析的にとらえた研究<sup>3)</sup>が主流であったが、最近では、M.Mejia & Rodriguez-Iturube (1974)<sup>4)</sup>のように、降雨場を確率場として表現しようとする研究や松林ら<sup>5)</sup>のようにフーリエスペクトルを用いて降雨場を表現しようとする研究が行われている。しかしこれらの研究では、降雨場にとって重要な影響を与えると思われる降雨の成因は考慮されていない。降雨の成因を考慮した研究として、寒川による降雨の生起確率の評価に関する研究<sup>6)</sup>が挙げられる。これによると、降雨の母集団を成因ごとに分離して確率評価を行えば、分離していない時に比べて大きな確率水文学量と同じ生起確率に対して得られることがあるようである。

そこで本研究では、降雨の時空間分布は、台風性や前線性などの降雨成因により特徴があるという観点にたち、大阪を中心とした都市部を対象として、建設省が大阪府の最西北部の深山に設置したレーダ雨量計の降雨データを用い、降雨成因を考慮した降雨場の時間的・空間的な分布の解析を行う。本研究における降雨の解析には、従来から行われているDAD解析(D(Duration):降雨継続時間, A(Area):降雨面積, D(Depth):降雨量)の他に、これまであまり解析が行われていない降雨場形状(降雨場を長円とみなしたときの主軸方向およびその長軸と短軸の比率)についても解析を行う。また、これらの解析結果を計画降雨に適用する場合には、あらかじめ特徴的な降雨の時空間分布のパターンを作成しておく必要がある。そこで、DADの解析結果を用いて、降雨の時空間分布を特徴的なグループに分類するために降雨のクラスター解析を行う。

## 2. 降雨資料の概要

本研究は、都市域における、中小河川の治水計画で用いる計画降雨を作成するための基礎データとして資することを目的としている。そのため、研究の対象範囲は、大阪を中心とした大阪平野の都市部、経度方向に28 km、緯度方向に44 kmの約1,200 km<sup>2</sup> (Fig. 1に破線で示された中枠の範囲)とする。

降雨の時空間分布を解析するためには、時間・空間ともに広範囲にわたる密な降雨観測データが必要となる。気象庁が全国に配置している地域気象観測システムAMeDASは、平均設置距離が17 kmと粗く、観測時間間隔も1時間と長いため、10分単位のような短時間の降雨を解析することはできない。一方、建設省が設置しているテレメータは、河川流域ごとを基本として設置されているため、場所により観測密度の差がある。また、このテレメータで得られる雨量データは10分間隔であることが多いが、磁気媒体でのデータ入手が困難なため、データ入手後の処理に時間がかかる。そこで、本研究においては、降雨の時空間分布の解析を行うのに適している、建設省が深山に設置したレーダ雨量計のデータを解析に用いる。また、降雨日の選定には、対象域内およびその周囲に存在するアメダス雨量観測所のデータを用い、一定規模以上の降雨を抽出する。

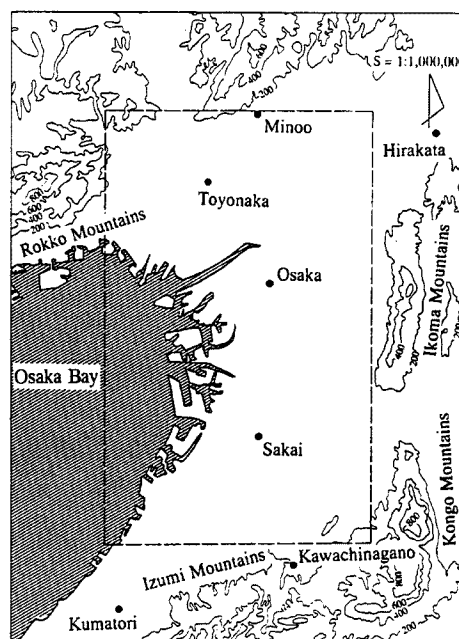


Fig. 1 Map of study area.

## 2.1 降雨成因の分類

降雨をもたらす気象擾乱はそれぞれ固有の物理的特性に起因する空間スケールと時間スケールをもつ<sup>7)</sup>。日本で使用されている気象擾乱のスケール分類は、大きくは、大規模擾乱、中間規模擾乱、中規模擾乱、積雲対流の4つに分類される。本研究で対象とする擾乱は、積雲対流から中規模擾乱であり、空間スケールで数 km から 10 km 程度、時間スケールで1日程度までのものである。この規模の気象擾乱における代表的な降雨の成因は、台風によるもの、前線によるもの、低気圧によるもの、大気的不安定によるもの(多くの場合、雷を伴った降雨)の4つが挙げられる。本研究では、それぞれの成因を台風性、前線性、低気圧性、雷雨性と呼ぶ。

降雨成因の判断は、降雨が生じた時の天気図(9時の地上天気図および21時の地上、850 hPa=高度約1,500 m, 700 hPa=高度約3,000 m, 500 hPa=高度約5,400 mの天気図)を参考にして分類する。ただし、複数の成因により降雨が生じていると思われるときは、その中で影響がいちばん強いと考えられる成因に分類する。

## 2.2 解析対象降雨の選定

解析の対象とする降雨の選定は、対象とする範囲およびその近辺に存在するアメダス雨量観測所6ヶ所(箕面、枚方、豊中、大阪、堺、河内長野)の雨量を基準とする。また、深山のレーダー雨量計システムは、1982年(昭和57年)から運用が開始されているため、アメダス雨量データについても1982年から1992年までの11年間を対象とする。

選定する降雨の基準は、6ヶ所のアメダス雨量観測所の中で1カ所でも1時間雨量が30 mmを越えた地点が存在する降雨とする。抽出した降雨は全部で38降雨であり、それら抽出した降雨の一覧をTable 1に示す。ただし、レーダー雨量計のデータは一部欠測等により、33降雨のデータが使用可能である。

抽出した38降雨の降雨成因別の発生数は、台風性5降雨、前線性17降雨、低気圧性5降雨、雷雨性11降雨であり、前線によってもたらされた豪雨の数が一番多い。また、発生した月をみると、6月に4降雨、7月に7降雨、8月に15降雨、9月に11降雨、その他に1降雨となっている。8月に発生した降雨数が一番多いが、その中で降雨成因をみると、15降雨中8降雨が雷雨性の降雨となっており、夏場の大気的不安定さが表れている。

## 2.3 解析に使用するレーダー雨量データ

本解析には、建設省が大阪府の最西北部の深山に設置し、昭和57年からシステム運用を行っているレーダー雨量計のデータを用いる。レーダー雨量計は、降雨の時空間分布を把握するのに適しているが、テレメータでの雨量の直接観測とは異なり間接測定であるためシステムにより特徴がある。そこで、ここで若干の解説を加えることとする。

深山レーダーは、波長5 cmのCバンドで走査するレーダー雨量計であり、観測手順はビームの仰角を最低仰角 $0.8^\circ$ (1989年以降は $0.4^\circ$ )で固定した仰角固定観測を1分間、仰角を $22.5^\circ$ から $1^\circ$ まで変化させる仰角可変観測を4分間の、合計5分を1サイクルとして連続観測を行っている。ここで使用するデータは、仰角固定時観測のものである。仰角固定時観測も地表面に対してある角度を持っているため、レーダーサイトからの距離に応じてレーダがとらえる降雨の高度は厳密には異なるが、本研究における対象範囲は狭いため、この問題について無視できるものとする。また、レーダー雨量計のデータの1メッシュの大きさはレーダからの距離によって異なるが、本対象範囲では、ほぼ $4 \text{ km}^2$ であるため、解析に用いるデータは $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ のメッシュに変換した5分ピッチの雨量データとする。

Table 1 Selected rainfalls by using AMeDAS data.

1) No.	Date	Maximum 1-hour Rainfall (24-hour rainfall) (mm)						2) Rainfall type
		Minoo	Hirakata	Toyonaka	Osaka	Sakai	Kawachi Nagano	
*1	82.07.11	34 (76)	7 (27)	7 (28)	4 (20)	4 (17)	3 (11)	T
2	82.08.01	13 (92)	16 (134)	10 (76)	16 (102)	14 (116)	33 (213)	T
3	82.08.03	4 (16)	18 (56)	19 (31)	22 (85)	36 (163)	31 (143)	L
*4	82.08.08	26 (28)	0 (0)	38 (56)	11 (13)	19 (22)	1 (3)	S
5	82.08.09	5 (8)	54 (81)	7 (12)	1 (2)	0 (0)	7 (8)	S
6	82.08.10	0 (0)	30 (38)	0 (0)	0 (0)	9 (10)	0 (0)	S
7	83.07.05	17 (53)	22 (60)	32 (81)	21 (73)	25 (68)	39 (73)	F
8	83.08.21	33 (47)	48 (49)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (5)	L
9	83.09.01	17 (29)	31 (35)	14 (16)	1 (1)	1 (1)	0 (0)	S
10	83.09.28	30 (259)	15 (111)	32 (272)	21 (149)	25 (71)	25 (96)	T
11	84.06.20	15 (32)	41 (52)	19 (30)	14 (25)	16 (51)	7 (22)	F
12	84.06.27	9 (18)	13 (27)	36 (49)	30 (49)	18 (36)	8 (25)	F
13	84.07.12	16 (17)	0 (0)	18 (32)	37 (39)	11 (13)	24 (27)	F
14	85.06.22	29 (58)	26 (83)	21 (49)	33 (51)	15 (33)	8 (26)	F
*15	85.06.25	14 (121)	12 (40)	9 (85)	17 (93)	32 (117)	17 (64)	F
16	86.07.10	36 (60)	28 (53)	14 (33)	11 (15)	5 (10)	24 (33)	F
17	86.07.21	34 (70)	31 (137)	10 (32)	22 (43)	40 (50)	5 (9)	F
18	86.08.22	12 (17)	3 (3)	7 (8)	30 (55)	10 (25)	0 (0)	L
19	87.08.05	13 (15)	8 (11)	30 (32)	23 (24)	22 (30)	28 (44)	L
20	87.08.18	11 (23)	16 (42)	34 (36)	1 (2)	5 (7)	0 (0)	F
21	87.09.11	0 (0)	16 (22)	1 (1)	35 (51)	9 (15)	6 (14)	F
22	88.07.16	25 (46)	33 (72)	20 (43)	26 (50)	3 (6)	2 (2)	F
23	88.08.05	0 (0)	31 (34)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (1)	S
24	88.08.17	0 (0)	0 (0)	1 (1)	1 (1)	0 (0)	41 (46)	S
25	88.08.19	0 (0)	0 (0)	34 (45)	0 (0)	1 (1)	0 (0)	S
26	88.08.24	22 (36)	8 (9)	51 (53)	5 (6)	74 (98)	13 (19)	S
27	88.08.25	0 (0)	7 (7)	1 (1)	3 (4)	30 (32)	8 (10)	S
28	88.09.03	0 (0)	0 (0)	2 (2)	31 (38)	1 (2)	0 (0)	S
29	88.09.11	10 (10)	51 (53)	8 (8)	15 (16)	0 (0)	1 (2)	F
30	89.08.27	15 (76)	31 (95)	16 (68)	20 (67)	13 (45)	21 (48)	T
*31	89.09.03	33 (175)	21 (149)	24 (151)	22 (174)	35 (159)	27 (125)	F
32	89.09.06	10 (18)	34 (56)	13 (23)	7 (23)	9 (18)	16 (26)	F
33	89.09.14	41 (87)	30 (49)	44 (124)	23 (37)	4 (8)	2 (5)	F
34	89.09.19	17 (76)	12 (68)	16 (48)	29 (97)	41 (124)	36 (132)	T
35	90.02.11	25 (51)	22 (53)	30 (45)	11 (31)	9 (33)	18 (55)	L
*36	90.07.12	26 (68)	46 (72)	28 (56)	26 (80)	12 (36)	11 (19)	T
37	90.09.13	2 (7)	38 (43)	38 (68)	63 (106)	2 (2)	35 (37)	F
38	90.09.24	3 (7)	7 (20)	4 (13)	32 (54)	11 (12)	8 (18)	F

1) \* : Data of rader raingage at Miyama is missing.

2) T : Typhoon ; F : Frontal ; L : Low ; S : Thunder

### 3. 降雨の時空間分布の解析

これまでの研究において、降雨の時空間分布と言えは降雨のDAD解析を指すことが多く、降雨場の形状について言及されることはほとんどなかった。しかし、ほとんどの場合、降雨場が同心円の等雨量コンターを描くことはまれで偏平性をもっており、これについても調査する必要がある。そこで、本研究では、降雨のDAD解析だけでなく、降雨場形状の解析も行う。

### 3.1 解析方法

#### (1) DAD 解析

DAD 解析は、時間については、10分、30分、1時間、3時間、6時間、12時間、24時間の雨量、面積については200 km<sup>2</sup>までの雨量にもとづいて次のような方法で解析を行う。

- ① 5分ごとのレーダー雨量データを、2kmメッシュの雨量に変換する。ただし、仰角固定時観測で得られた降雨強度は、5分間は一定であるとしてデータを用いる。
- ② 10分、30分の雨量については10分ごと、1時間以上の雨量については30分ごとの雨量分布データを、①で得られた5分ごとの降雨データを用いて作成する。
- ③ 雨量分布データをもとに、降雨量の最も多いメッシュから、そのメッシュ近傍8点においてメッシュ降雨量の多い順に雨量を足し合わせ、面積平均雨量データを作成する。
- ④ 各時間ステップごとに面積平均雨量を算定した結果を、降雨時間および降雨面積についてそれぞれ最大値で包絡した値をもって最終のDAD解析結果とする。

#### (2) 降雨場形状の解析

降雨場形状を表す要素としては、Fig. 2に示すように、降雨場を長円とみなしたときの長軸・短軸比(以下、形状比と呼ぶ)および長軸(主軸)方向の2要素をあげることができる。

主軸方向の算定のためには、まず、降雨場の中心を式(1)によって算定する必要がある。

$$X_g = \frac{\sum R_{ij} \cdot X_{ij}}{\sum R_{ij}}, \quad Y_g = \frac{\sum R_{ij} \cdot Y_{ij}}{\sum R_{ij}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $R_{ij}$ :  $ij$ メッシュの降雨量、 $X_{ij}$ ,  $Y_{ij}$ :  $ij$ メッシュの基準点からの $X$ 方向(経度方向)の距離、 $Y$ 方向(緯度方向)の距離である。

また、主軸方向 $\alpha$ は、次式で表される降雨場の中心におけるモーメント $M_\alpha$ を最小にする角度である。

$$M_\alpha = \sum \frac{\{\tan \alpha (X_{ij} - Y_g) - (Y_{ij} - Y_g)\}^2}{\tan^2 \alpha + 1} \cdot R_{ij} dA \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $X_g$ ,  $Y_g$ はそれぞれ降雨場の $X$ 方向、 $Y$ 方向の重心、 $dA$ は1メッシュの面積である。

従って、

$$dM_\alpha / d\alpha = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

を条件として上式を微分すれば次式が得られる。

$$\frac{\sum \{(X_{ij} - X_g)^2 - (Y_{ij} - Y_g)^2\} \cdot R_{ij} dA}{\sum (X - X_g)(Y - Y_g) \cdot R_{ij} dA} \tan \alpha + \tan^2 \alpha - 1 = 0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

この(4)式に示される $\tan \alpha$ に関して2次の方程式を解けば、主軸方向 $\alpha$ とそれに直交する角度 $\alpha'$ を求めることができる。

降雨場の形状比は、NOAAの研究<sup>8)</sup>にみられるように、あらかじめ楕円形のテンプレートを作成しておき、そのテンプレートに最も当てはまる形状比をもって評価する方法のような人間の感覚による手法が主流である。しかし、この方法による場合、多数の降雨場を解析することは時間的に困難であり、なんらかの定式化が必要である。形状比の算定は、降雨強度が大きな部分が想定した楕円に最も当てはまるように行うべきであり、本研究においては、次のよう方法で客観的に形状比を算定することを試みる。ただし、定式化は降雨場の大きさを考慮して決める必要があり、以下に示す式による場合は、2km間隔メッシュの200 km<sup>2</sup>までの降雨場に適応した結果、人間の感覚に近い結果を算定することを確認している。

まず、形状比が  $m$  であるとして、降雨場の中心から距離  $L$ 、主軸方向と角度  $\theta$  をなす  $ij$  地点のメッシュを通過する楕円と同面積を持つ円を考えたときの半径  $r_{ij}$  は、

$$r_{ij} = L \sqrt{\sin^2 \theta / m + m \cos^2 \theta} \quad \dots\dots (5)$$

と表される。

ここで、 $m$  の満たす条件を、

$$F = \sum (r_{ij}^2 \cdot R_{ij}) \rightarrow \min \quad \dots\dots (6)$$

として、(6)式を  $m$  について微分すれば、

$$m = \sqrt{\frac{\sum R_{ij} L_{ij}^2 \cos^2 \theta}{\sum R_{ij} L_{ij}^2 \sin^2 \theta}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となり、形状比  $m$  を求めることができる。

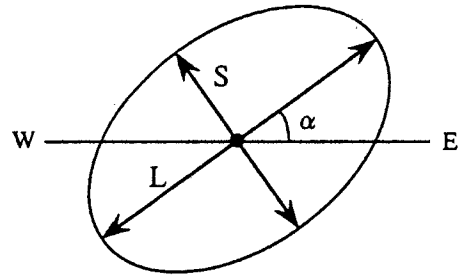


Fig. 2 Schematic model of precipitation pattern.

3.2 解析結果および考察

(1) DAD 解析

本解析における最小の解析面積  $4 \text{ km}^2$  は、ほぼ地点雨量に相当するとして、以下、記述上  $4 \text{ km}^2$  に対する降雨量を地点雨量と呼ぶことにする。

Table 2 は、それぞれの対象降雨において、最大1時間地点雨量を1.0とする基準として、1時間雨量および24時間雨量の各面積平均雨量の割合を比率で表し、その平均と分散を降雨成因ごとに求めた表である。これによると、1時間雨量では、台風性、前線性、低気圧性降雨は、降雨の空間的分布にそれほど違いはないが、雷雨性降雨では  $100 \text{ km}^2$  から  $200 \text{ km}^2$  の降雨場にかけて急速に降雨量が減少しており、雷雨性降雨の空間スケールの小さいことが分かる。また、24時間雨量で見ると、台風性降雨が他の3つの成因に比

Table 2 Rainfall ratio at selected area sizes.  
(Standard rainfall is for  $4 \text{ km}^2$ , 1-hour rainfall.)

Enclosed area ( $\text{km}^2$ )	1-hour average rainfall			24-hour average rainfall			
	24	100	200	4	24	100	200
Typhoon	0.912 (0.002)	0.763 (0.003)	0.629 (0.011)	4.122 (0.282)	3.981 (0.234)	3.686 (0.222)	3.463 (0.176)
Frontal	0.892 (0.003)	0.682 (0.020)	0.556 (0.028)	1.997 (0.315)	1.826 (0.286)	1.498 (0.245)	1.311 (0.250)
Low	0.916 (0.003)	0.680 (0.023)	0.558 (0.042)	2.233 (1.553)	2.102 (1.463)	1.817 (1.329)	1.621 (1.406)
Thunder	0.841 (0.012)	0.534 (0.021)	0.362 (0.014)	1.342 (0.069)	1.138 (0.060)	0.765 (0.048)	0.570 (0.038)

note : The value in ( ) means the variance of ratio.

べて規模が大きく、前線性と低気圧降雨は類似した時空間分布構造を持っていることが分かる。また、低気圧性降雨での分散の値が大きいのは、低気圧性降雨のサンプル数が4つと少ない上に、そのサンプルの中に、大陸で消滅した台風に伴う湿舌が低気圧に流入したことによって長時間大規模な降雨が続いた降雨が含まれているからである。

**Fig. 3** には、最大1時間地点雨量と最大24時間地点雨量の関係を図示したものである。これによると、台風性降雨の場合、データ間を結んだ直線の勾配は前線性や雷雨性降雨に比べ大きく、1時間の地点雨量の規模が大きくなるに従い、全体の降雨規模も前線性や雷雨性の降雨より大きくなる傾向があることがわかる。ただし、低気圧性降雨については、1時間雨量と24時間雨量の間には明確な相関は認められない。

次に、**Fig. 4** は、降雨の空間的な広がりを見るために、 $4\text{ km}^2$  と  $200\text{ km}^2$  に対する面積平均降雨量の比率を1時間雨量と24時間雨量について調べた結果である。過去の研究によると<sup>3)</sup>、最大雨量の大きなケースほど最大雨域面積が小さくなり、最大雨量の小さいケースは最大雨域面積が大きくなる傾向があるとされているが、今回の研究で

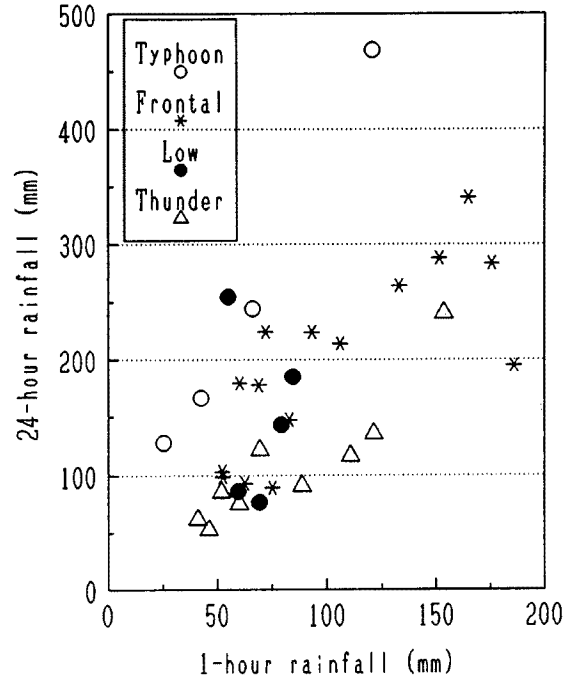


Fig. 3 1-hour versus 24-hour point rainfall for selected rainfalls.

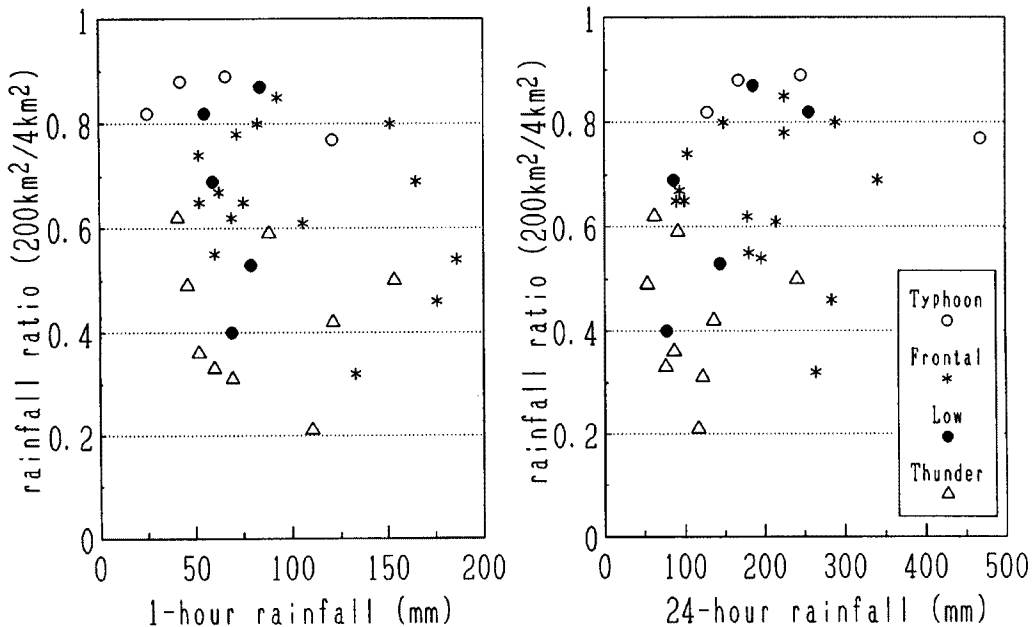


Fig. 4 Rainfall ratio of  $200\text{ km}^2$  to  $4\text{ km}^2$  average rainfall for 1-hour and 24-hour rainfall.

も、1時間雨量については、最大雨量が大きくなると、同じ最大雨量における雨量比率の最大値が小さくなる傾向、すなわち、最大雨量が大きくなると最大雨域面積が小さくなる傾向がみられる。しかし、24時間雨量については、そのような傾向はみられない。また、3時間、6時間、12時間雨量についても同様に調べると、3時間雨量については1時間雨量と同じ傾向が、6時間、12時間雨量については、24時間雨量と同様な傾向がある。ここで全体的に言えることは、最大雨量にかかわらず台風性の降雨の場合は雨域面積は大きく、雷雨性降雨の場合には雨域面積は小さく、前線性や低気圧性の降雨の場合はケース・バイ・ケースであることが多いということである。

Fig. 5は1時間以内の短時間降雨を調べるために、1時間の地点雨量に対する10分と30分雨量の比率を図示したものである。これによると、平均すると、1時間雨量に対して、10分でその約4割、30分で約7割の降雨が生じていることがわかる。ただし、雷雨性降雨については、1時間雨量の多少にかかわらず、10分で30mm程度の降雨しか生じていない。これは、降雨場における、降雨に変換可能な水蒸気量が雷雨

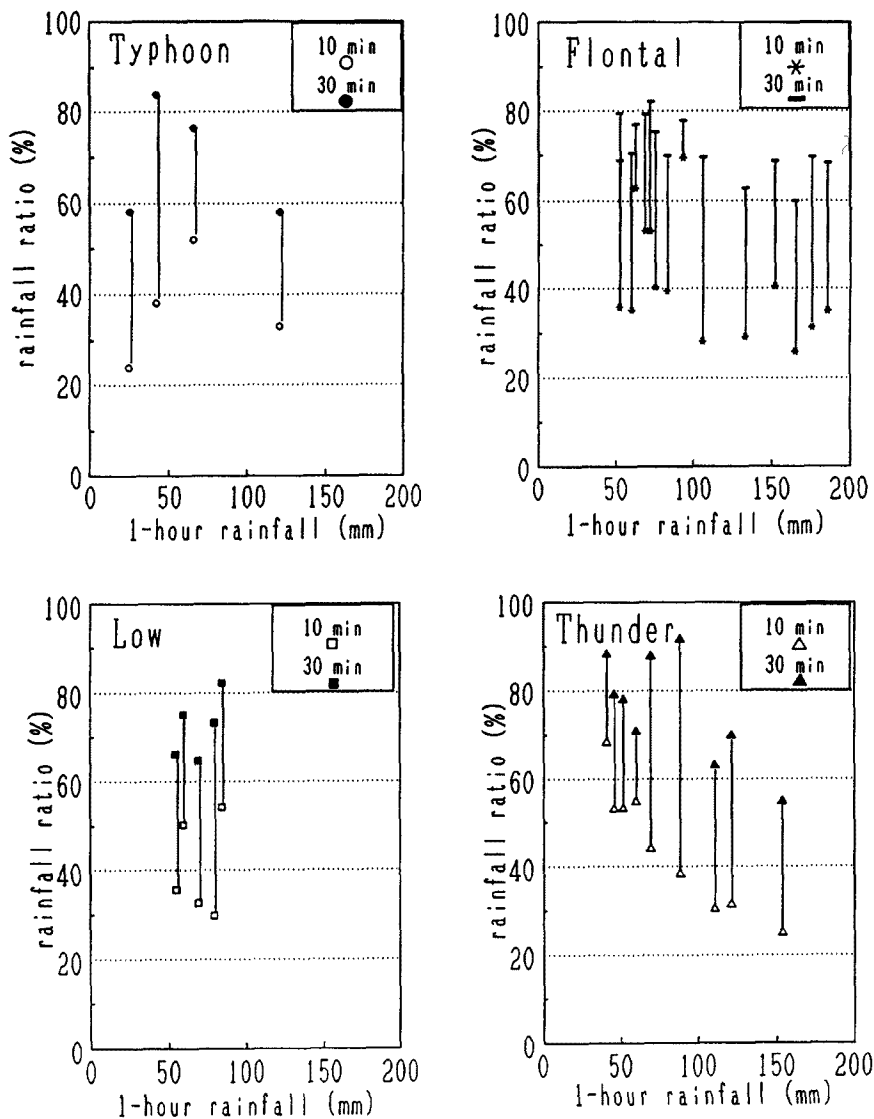


Fig. 5 Rainfall ratio for 10-min and 30-min in 1-hour rainfall.



性降雨では少ないことによるものと考えられる。また、「10分雨量は、1回の気柱の転倒、または、1回の気塊の上昇によって放出される降水であり、それは単位気柱に含有する水蒸気量に相当し、上限は約70mmである。」<sup>7)</sup>とされているが、今回の研究での10分雨量の最大値は、前線性降雨における65mmであり、従来の研究を裏付けるものと思われる。

(2) 降雨場形状解析

1時間雨量および24時間雨量の分布にもとづいて、降雨場を長円とみなしたときの主軸方向および長軸・短軸比の形状比を調べる。ただし、降雨場の中心が、対象領域の境界から5km以内の場合は、境界の影響を解析結果が受けると考え解析結果からは除外する。

(a) 主軸方向

一連の降雨の1時間雨量、24時間雨量分布のなかで、最大地点雨量を示し最も発達した段階であると考えられる降雨場の主軸方向を、それぞれFig. 6とFig. 7に示す。ただし、図中で箱型で示されている方向は、次に示す降雨場の形状比 $m$ が2.0以上のもの、すなわち、偏平性が高い降雨場の主軸方向である。また、主軸方向に添えている文字は、降雨の成因を示すものであり、T：台風性降雨、F：前線性降雨、L：低気圧性降雨、S：雷雨性降雨である。

主軸方向が特に明確に表れるのは、前線性降雨がバンド状になって生じているときが多いが、台風性降雨も、雨域の進行方向に対して主軸方向を示すこともある。

どちらの時間雨量の分布に対しても、降雨場の主軸方向は、大阪湾から枚方方面へのびていることがわかる。これは、中北の研究<sup>9)</sup>にみられるように水蒸気の流入場が大阪湾からもたらされることが多いうえに、対象域のまわりが西北方面が六甲山脈、西側が生駒山地、南側が和泉山地および金剛山地に囲まれている地形の影響であると考えられる。

(b) 降雨場の形状比

主軸方向の場合と同様に、1時間雨量、24時間雨量分布の降雨場に対する形状比を調べ、その結果をTable 3にまとめる。

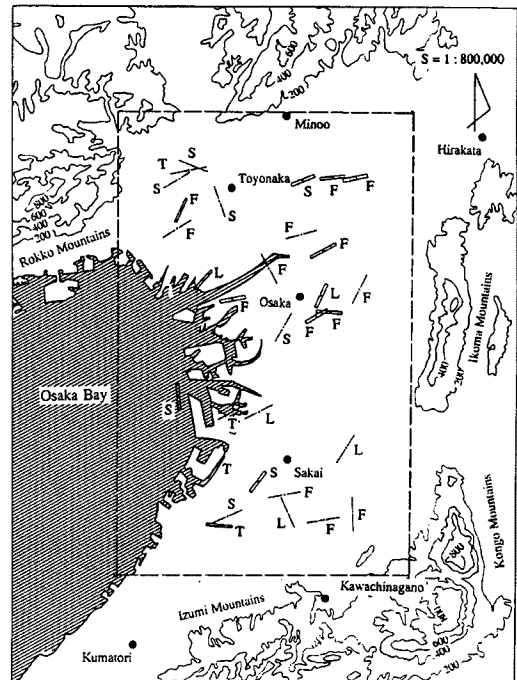


Fig. 6 Location and orientation of precipitation pattern for 1-hour rainfall.

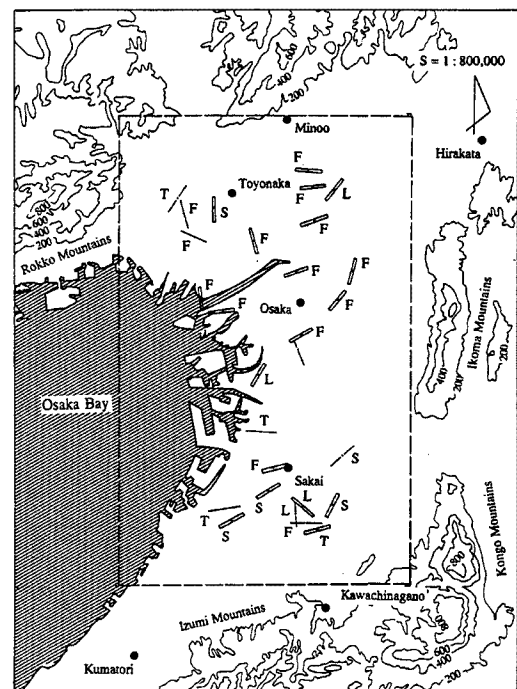


Fig. 7 Location and orientation of precipitation pattern for 24-hour rainfall.

Table 3 Shape ratio for selected rainfalls.

		Typhoon	Frontal	Low	Thunder
1-hour Rainfall	Range	1.1~5.2	1.1~4.8	1.1~3.5	1.2~5.0
	Average	2.0	2.1	2.1	2.1
	Variance	0.89	0.58	0.45	0.63
24-hour Rainfall	Range	1.2~1.8	1.1~3.8	1.2~2.7	1.1~2.5
	Average	1.4	2.2	1.8	1.7
	Variance	0.06	0.72	0.32	0.24

1時間雨量を対象にした場合では、降雨の成因によって大きな差はないが、24時間雨量を対象にした場合には、前線性降雨の偏平性が高いことがわかる。このことを詳しくみるために、降雨成因ごとに最大地点雨量と形状比との関係を調べた結果を Fig. 8 と Fig. 9 に示す。これから分かるように、1時間雨量を対象にした場合、降雨量が大きくなるにしたがい形状比が小さくなる傾向が認められる。また、24時間雨量を対象にした場合、前線性降雨は地点雨量の大小にかかわらず、偏平性が高いことがわかる。

#### 4. クラスタ解析を用いた降雨の時空間分布特性の分類

これまでの解析で、降雨の成因ごとに降雨場に特徴があることがわかる。これを都市河川の治水計画の計画降雨に反映させるためには、特徴的なグループを代表できるような複数の設計降雨が必要となる。そこで、ここでは先に行った DAD 解析結果をもとに、一連の降雨場を24時間の最大地点雨量を基準として降雨の DAD を正規化したベクトル場としてとらえ、クラスタ解析を行う。

過去の研究においてクラスタ解析は、リモートセンシングで得られる大量のデータを分類することに用いられることが多かったが、Kalkstein らは<sup>10)</sup> 気候の分類に適用している。これは、環境問題の広範な変化に与える気候のインパクトを評価するために気候の分類に利用した研究である。また、本研究のように、降雨の時空間分布の分類に適用することは、これまでに行われていないようである。

##### 4.1 クラスタ解析手法

###### (1) DAD 解析結果のベクトル化

24時間地点雨量を1.0とする基準として、次に示す2通りの変数パターンを正規化した7次元と19次元のベクトル場に DAD 解析結果を変換する。

###### ・パターン A

4 km<sup>2</sup> に対する1時間、3時間、6時間、12時間の各雨量

24 km<sup>2</sup>, 100 km<sup>2</sup>, 200 km<sup>2</sup> に対する24時間の各雨量

###### ・パターン B

4 km<sup>2</sup> に対する1時間、3時間、6時間、12時間の各雨量

24 km<sup>2</sup> に対する1時間、3時間、6時間、12時間、24時間の各雨量

100 km<sup>2</sup> に対する1時間、3時間、6時間、12時間、24時間の各雨量

200 km<sup>2</sup> に対する1時間、3時間、6時間、12時間、24時間の各雨量

パターン A は、パターン B の変数から一部を省略したものであり、降雨場の時間的な広がりや地点雨量の時間雨量の変化で代表させ、空間的な広がりを24時間雨量における面積平均雨量の変化で代表させたものである。

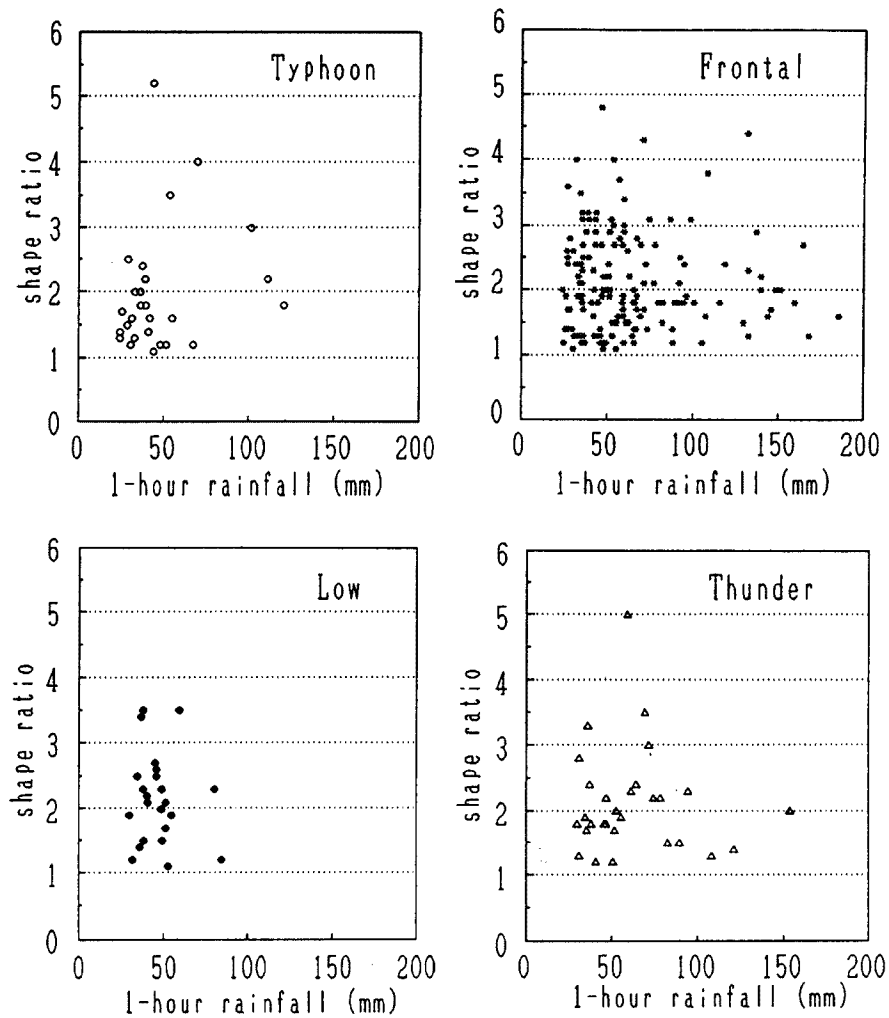


Fig. 8 Shape ratio of precipitation pattern for 1-hour rainfall.

## (2) クラスタ解析手法

クラスタ解析手法には、いくつかの手法があるが<sup>10)</sup>、今回の検討では、1クラスタ内に含まれる要素数を同じ程度に分割する特徴がある群平均法 (Average linkage method)、重心法 (Centroid method)、ウォード法 (Ward's method) の3つの手法を適用する。

3手法の差は、2つのクラスタ間の距離の計算方法によって異なる。

- ・群平均法では、2つのクラスタ間の距離は、各クラスタから1つずつとったオブザーベーションのペア間の距離 (ここでは、ユークリッド距離の2乗) の平均値で定義される。
- ・重心法では、2つのクラスタ間の距離は、各クラスタの重心 (平均値) 間の距離で定義される。
- ・ウォード法では、2つのクラスタ間の距離は、クラスタ間の群間平方和を全変数について合計した値である。

今回の計算では、SASによる統計解析処理プログラムで解析を行う。

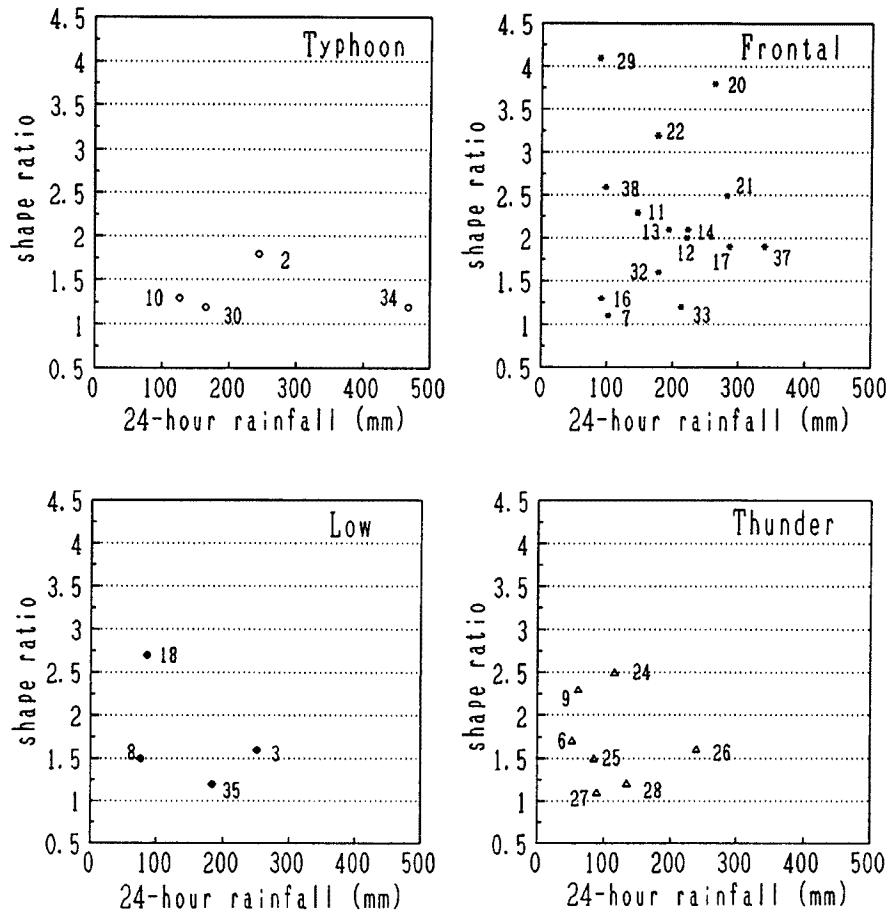


Fig. 9 Shape ratio of precipitation pattern for 24-hour rainfall. Identification numbers refer to table 1.

#### 4.2 解析結果および考察

クラスター解析を行った結果を Table 4 に示した。変数パターン A と B を用いた両方とも、降雨を大きくは 3 つのクラスターに分類している。それぞれのクラスターをみると、変数パターン A, B のどちらの解析の場合も、クラスター 1 は長時間、広範囲にわたって降雨が持続する降雨が多く、台風型クラスターと呼ぶことができる。このクラスターに、前線性降雨も多く含まれていることからわかるように、前線性降雨も規模が大きくなると、台風性の降雨と同じような現象スケールで雨が降っている。クラスター 2 は時間的には数時間程度、降雨面積も小さい範囲の降雨クラスターであり、雷雨型クラスターと呼ぶことができる。また、クラスター 3 は前線性降雨がほとんどであり、降雨強度はあまり強くないが、ある程度の強度を保った、しとしとした降雨が長時間、広範囲にわたって降る降雨であり、前線型クラスターと呼ぶことができる。

変数パターン A と B では、若干の降雨について分類されるクラスターが異なるが、これはパターン A では変数の数が少ないため、時間的、空間的な降雨の広がりを十分表現できていないことによるものである。また、クラスター分析手法の違いをみると、変数パターン A の場合には、手法間の結果の違いが少しみられるが、パターン B の場合は、どの手法でも同じ結果となっている。

このように、クラスター解析を行えば、降雨の時空間分布は、大きくは 3 つに分類することができること

Table 4 Size of clusters obtained with each procedures.

Variable	Clustering	Cluster No.														
		1					2					3				
		T	F	L	S	total	T	F	L	S	total	T	F	L	S	total
A	Average	4	6	1	1	12	-	4	2	7	13	-	5	2	1	8
	Centroid	4	4	1	-	9	-	4	2	7	13	-	7	2	2	11
	Ward's	4	6	1	1	12	-	4	2	8	14	-	5	2	-	7
B	Average	4	6	1	1	12	-	2	2	7	11	-	7	2	1	10
	Centroid	4	6	1	1	12	-	2	2	7	11	-	7	2	1	10
	Ward's	4	6	1	1	12	-	2	2	7	11	-	7	2	1	10

がわかる。これは先に述べた DAD 解析を行った時の降雨成因ごとの違いを特徴づけるものである。今後、河川計画における設計降雨も、降雨の DAD の特徴的な 3 種類程度を想定したモデルを作り、降雨場形状の特性をその上加味していくことが必要であると考えられる。

## 5. 結 論

本研究は、大阪平野の都市部に降った降雨を対象とし、レーダー雨量データを用い、降雨の成因を考慮した DAD 解析などの統計的解析を行った。ここで得られた成果と今後の課題を以下にまとめておく。まず、成果として、

(1) 1982 年から 1992 年までの、11 年間のアメダスデータを用い、大阪を中心とした都市部における豪雨を抽出した。

(2) 抽出した豪雨を降雨の成因ごとに分類した結果、豪雨をもたらす降雨成因は前線性降雨によるものが多く、また、月別の豪雨発生数が多い 8 月では雷雨による豪雨が多く、夏場の大気的不安定さが高いことがわかった。

(3) 降雨の成因を考慮した DAD 解析を行い、降雨成因ごとの特徴をあきらかにした。また、これまで、あまり研究が行われていない、10 分や 30 分雨量についても解析を行い、雷雨性降雨の短時間降雨が前線性などの他の成因の降雨と比べて降雨強度の弱い傾向があることを明らかにした。これは、夏場の大気中の水蒸気量が少ないことによると思われるが、詳細は別途検討を要する。

(4) 降雨場の形状について解析を行い、主軸方向については、水蒸気の流入状況や地形の影響と考えられるが、大阪湾から枚方方面に向かう角度を示しており、また、降雨場の形状比については、前線性降雨の場合大きな値を示すこと、すなわち、扁平した形状を示す傾向があることがわかった。

(5) DAD 解析結果にもとづいて降雨のクラスター分析を行い、降雨を大きくは、台風型降雨、雷雨型降雨、前線型降雨の 3 種類のグループに分類した。

などが挙げられる。さらに、今後の課題として、

(6) 降雨場の水蒸気量と降雨強度の関係の調査。

(7) 降雨の時間的な配分に関する検討。

(8) 計画降雨を作成するときの、降雨の時空間分布を確率的に評価するためのパラメータ導入方法の検討。

などがある。今後、さらにデータ解析を行い、都市における降雨の構造を明らかにしていくとともに、河川計画における計画降雨に関して研究で得られた新たな知見を取り込んでいく検討を行い、都市河川の計画が

より安全なものになるように研究をすすめていきたいと考えている。また、計画論上のフェール・セーフの検討のためにも、単位時間に降ることが可能な最大降雨である最大可能降水量 (PMP; Probable Maximum Precipitation) の算定も試みたい。

最後に、本研究にあたって、貴重な資料提供を頂いた財団法人気象協会関西本部および建設省近畿地方建設局淀川ダム統合管理事務所に感謝の意を表するとともに、資料の解析は京都大学大型計算機センターで行なったことを付記し謝意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) 都市河川計画の手引き—洪水防御計画編—：財団法人国土開発技術センター，1993，pp.3-5
- 2) 日本河川協会編：改訂建設省河川砂防技術基準（案），計画編，山海堂，1977，pp.12-15
- 3) 高木不折・原田守博・阿知波正道：名古屋市における豪雨の空間分布特性の統計的評価，昭和62年度科学研究費補助金研究成果報告書（研究代表者：高木不折），都市流出に係わる豪雨の時空間的広がりに関する研究，1988，pp.20-23
- 4) M.Mejia & Rodriguez-Itrube：On the synthesis of random field sampling from the spectrum：An application to the generation of hydrologic spatial process，Water Resour. Res.，Vol. 10，No. 4，1974，pp.705-711
- 5) 松林宇一郎・林尚一郎・高木不折：計画降雨への空間分布特性の導入に関する一考察，水工学論文集，第37巻，1993，pp.45-50
- 6) 寒川典昭・片桐健：発生母集団毎の年最大日降水量とその頻度分析，水文・水資源学会研究発表会要旨集，1993，pp.152-153
- 7) 二宮洗三：雨とメソ・システム，東京堂出版，1981，pp.73-75
- 8) E.M.Hansen, L.C.Schreiner, and J.F.Miller：Application of Probable Maximum Precipitation Estimates-United States East of 105th Meridian, NOAA Hydrometeorological Report, No.52, 1982, pp.15-29.
- 9) 中北英一：地形が降雨場に及ぼす影響を考慮した短時間降雨予測手法の開発と3次元レーダー情報利用に関する研究，京都大学学位論文，1990，pp.31-36
- 10) L.S.Kalkstein, G.Tan, J.A.Skindlov: An Evaluation of Three Clustering Procedures for Use in Synoptic Climatological Classification, J.Climate and Applied Meteorology, Vol. 26, 1987, pp.717-730
- 11) SAS による判別およびクラスター分析コース，SAS ソフトウェア株式会社，1988，pp.8-9