

東京における降水の空間偏差と経年変化の実態

—都市効果についての検討—

藤 部 文 昭*

要 旨

16年間 (1979～1994年) のアメダス資料を使って東京とその周辺の降水量・降水頻度分布を統計的に調べるとともに、それ以前の資料も使ってこれらの経年変化を調べ、都市効果の有無を検討した。その結果、以下のことが見出された。(a) 降水量・降水頻度は、東京都心～山の手では正偏差(=周辺よりも多い)、東京湾岸では負偏差である。(b) 降水量の正偏差は暖候期の正午～夕方に大きい傾向があり、これは主として強い降水(≥ 5 mm/時)による。(c) bの傾向は都心で最も明瞭である。都心では経年的にも午後の降水の比率が増加している可能性がある。(d) 山の手では降水全般の頻度(≥ 1 mm/時あるいは ≥ 1 mm/日)にも正偏差があり、降水日数の経年増加傾向が認められる。これらのうちbとcは都市ヒートアイランドによる対流性降水の増加を反映している可能性があるが、a～dがすべて都市効果によるものとは考えられず、都市効果については慎重な見極めが必要であることが指摘された。

1. はじめに

都市が気象に及ぼす影響の1つとして、降水の変化が論じられる(吉野, 1961, 1977; 大後・長尾, 1972; 北出, 1980; 原田, 1982; Landsberg, 1981; Changnon ed., 1981)。ここ20年ほどは暖候期の強い降水や雷を対象にした報告が多く、都市域や工業地帯の風下でそれらの頻度の正偏差(=周囲よりも多い状態)が見出されている(Huff and Vogel, 1978; Changnon and Huff, 1986; Sanderson and Gorski, 1978; Westcott, 1995; Huff, 1995)。偏差は正午～夕方に大きい傾向があり、経年変化の面から午後の降水増加傾向を示した報告もある(Balling and Brazel, 1987; Jauregui and Romales, 1996)。また、弱い降水についても都市域の正偏差が示された例がある(大後・長尾, 1972; Sanderson and Gorski, 1978; Klaus *et al.*, 1983; 矢島ほか, 1996)。

しかし、降水に対する都市効果に否定的な見解を示した文献も少なくない。これらの中には、単に降水偏差が見つからなかったという報告のほか、偏差や経年

変化があることを認めた上で、その理由として自然の要因や観測上の偏りの影響があり得ることを指摘したものもある(Pittock, 1977; Lowry and Probáld, 1978; Clodman and Chisholm, 1996; 関口, 1970)。観測結果の解釈をめぐって研究者の意見が分かれた例としては、Chicago 郊外 (La Porte) の降水量変化をめぐる論争が知られている(原田, 1982)。都市気候の文献ではとかく都市の影響が強調されがちであるが、偏った認識に陥らないためには、こうした慎重論にも十分に耳を傾けつつ実態を確認していく必要がある。

東京については、都心部あるいは都区部の微雨日数(0.0mm あるいは0.1～1 mm)の増加や、8月の大雨日数(≥ 31 mm)の増加が指摘されてきた(吉野, 1957, 1977; Yonetani, 1982)。雨を降らせるものではないが、夏の晴れた日に現れる「環八雲」に関しても、その成因の一端として都市のヒートアイランドがかかわっていると見る見方がある(甲斐ほか, 1995)。しかし大雨日数については、その後の再解析によって1980年代には減少に転じたことが見出されており(Yamashita, 1990; Yonetani, 1989)、都市効果の検証は一筋縄ではいかないことがうかがえる。

また、上記の研究は東京の降水現象のうち特殊なタイプだけを扱ったものであり、降水一般の特性を捉え

* 気象研究所予報研究部。

—1997年4月15日受領—

—1997年8月18日受理—

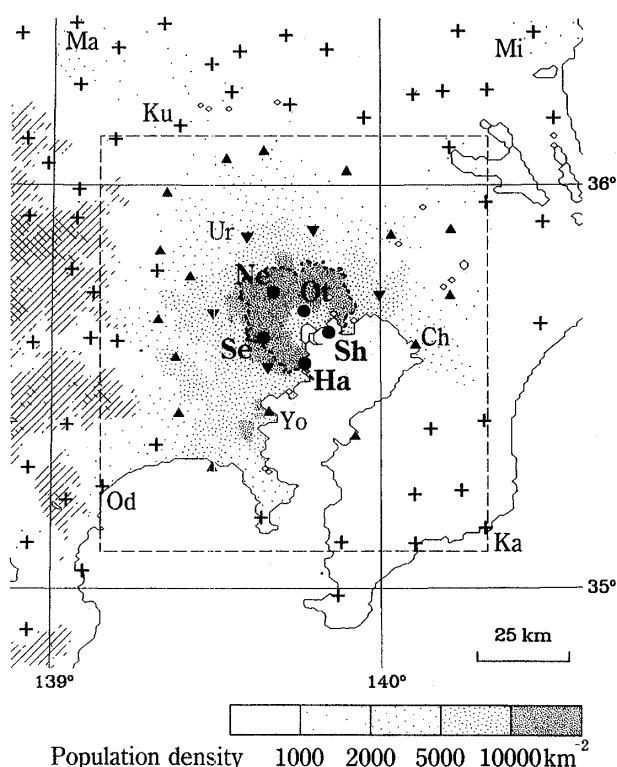


Fig. 1 Topography and population distribution of the area around Tokyo. The dotted line shows the ward area of Tokyo, and the dashed line shows the area shown in Figs. 2 and 3. Hatching shows the area above 600m from the mean sea level, and double hatching shows that above 1200 m. The stations within the ward area are shown in “●”, and those used for the interpolation of precipitation are shown in “▲” and “▼”. Other stations are shown in “+”. Station names are Otemachi, Nerima, Setagaya, Shinkiba, Haneda, Mito, Maebashi, Kumagaya, Urawa, Chiba, Katsuura, Yokohama and Odawara.

たものではない。外国の研究例が、気候条件の異なる日本の都市にそのまま当てはまる保証はなく、東京の降水についてはなお検証すべき余地が残されている。アメダスが本格運用され始めてから十数年が過ぎた現在、首都圏の降水の分布や経年変化の実態を確かめておくことは有意義であろう。

そこで本研究では、16年間のアメダス資料を使って東京とその周辺の降水量・降水頻度の分布を調べた。また、アメダス以前の資料も使ってそれらの経年変化を見積もった。得られた結果を解釈する際には、都市効果を肯定する部分だけではなく、否定的な部分にも注意を向けるようにした。

以下の文中、時刻はすべて日本時間である。

2. 東京周辺の降水分布

2.1 資料

1979～1994年のアメダスによる1時間降水量を使った。第1図は対象地点の配置と人口密度分布を示したものである（左端の斜線域は海拔600m以上および1200m以上の領域）。欠測・休止期間が全体の5%以上である地点は除いてある。このうち第1図の破線内（第2, 3図の範囲）にある41地点はすべて欠測率2%未満であり、その中の34地点では時間降水量の欠測率が0.5%未満、27地点では日降水量の欠測率が1%未満である。

人口密度10000人 km^{-2} 以上の地域はほぼ東京23区（点線の内側）に一致する。東京23区内のアメダス地点は大手町（気象庁＝千代田区）・練馬・世田谷・新木場・羽田の5つであり（●；それぞれ Ot, Ne, Se, Sh, Ha）、以後これらを“都区内地点”と言う。なお大手町の公式の地点名は“東京”であるが、ここでは便宜上この呼称を避けた。

2.2 解析方法

解析の基本方針は、都区内地点の降水量・降水頻度について、周辺の値からの偏差を求めることである。ただしその際、①周辺の降水分布自体が一様でない（第2図参照）ため、基準値の設定のしかたを工夫する必要がある；②偏差の有意性（信頼幅）を評価したい；という問題がある。今回は、①については2次曲面による内挿を使った。また②については降水量・降水頻度の年々変動から評価した。これは、年々の値はそれぞれ統計的な独立性が高く、信頼幅の評価に適していると考えたためである。以下、これらの手順を示す。

2.2.1 集計

各アメダス地点の降水量・降水頻度を、信頼幅の評価に使えるよう、年ごとに集計した。また降水偏差の季節変化や時間変化を調べる場合には、特定の月や季節、あるいは時刻や時間帯だけを集計対象にした。その後、欠測分を補正するため（対象期間の総数）÷（有効データ数）を掛けた。こうして得られた値を、以後 p_i と表す（ i は地点）。 p_i は年別の値であること、また解析目的によっては月別・季節別あるいは時刻別の値でもあることを覚えておいてほしい。

2.2.2 偏差の定義

都区内5地点における降水量・降水頻度偏差を、周

図21地点（第1図の▼と▲）からの内挿値との比で定義した。内挿には2次曲面

$$f(x, y) = b_1 + b_2x + b_3y + b_4x^2 + b_5xy + b_6y^2 \quad (1)$$

を使い、係数 $b_1 \sim b_6$ は最小2乗条件

$$\sum_j^J [p_j - f(x_j, y_j)]^2 \rightarrow \text{最小} \quad (2)$$

で求めた。ここで j は周辺地点であり、 J はその総数（=21）、 x と y はそれぞれ東西・南北座標である。これに基づいて、都区内地点 i における内挿値 $\bar{p}_i = f(x_i, y_i)$ を定義した。 p_i と同様、 $\bar{p}_i$ も年別値である。なお東京23区に近い5地点（第1図の▼）に平面

$$f(x, y) = c_1 + c_2x + c_3y \quad (3)$$

を当てはめた場合でも、あとの結果にはほとんど変化がなかった。

偏差は、 p_i , $\bar{p}_i$ の経年平均値（1979～1994年の16年平均値）をそれぞれ $\langle p_i \rangle$, $\langle \bar{p}_i \rangle$ として、両者の比

$$r_i = \langle p_i \rangle / \langle \bar{p}_i \rangle \quad (4)$$

で定義した。図や表では r_i から1を引いた値を%で表示した。

2.2.3 偏差の有意性の評価

r_i の信頼幅の計算方法として、次の2通りを試みた。

[1] 比の標準偏差の式

p_i , $\bar{p}_i$ の標準偏差を $\sigma(p_i)$, $\sigma(\bar{p}_i)$ と書き、共分散を $\text{cov}(p_i, \bar{p}_i)$ と書くと、 r_i の標準偏差 $\sigma(r_i)$ は、

$$\sigma(r_i) = \frac{\langle p_i \rangle}{\langle \bar{p}_i \rangle} \sqrt{\left(\frac{\sigma(p_i)}{\langle p_i \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\sigma(\bar{p}_i)}{\langle \bar{p}_i \rangle}\right)^2 - \frac{\text{cov}(p_i, \bar{p}_i)}{\langle p_i \rangle \langle \bar{p}_i \rangle}} \quad (5)$$

で与えられる（Hald, 1952）。ただしこの式は p_i や $\bar{p}_i$ の標準偏差が小さいこと（ $\sigma(p_i) \ll \langle p_i \rangle$, $\sigma(\bar{p}_i) \ll \langle \bar{p}_i \rangle$ ）を前提にしている。

[2] 最小2乗法による誤差評価

式(4)は r_i を未知数とする最小2乗条件

$$\sum_{n=1979}^{1994} \left[\frac{p_i(n)}{\sqrt{\bar{p}_i(n)}} - r_i \sqrt{\bar{p}_i(n)} \right]^2 \rightarrow \text{最小} \quad (6)$$

の解になる（ n は年）。そこで、最小2乗法の誤差評価の手順で r_i の標準偏差を計算することができる。ただしこれは、“ $\bar{p}_i$ を独立変数と見なした場合の p_i の分散が

$\bar{p}_i$ に比例する”という仮定に基づいている。

偏差の有意性は、 $r_i = 1$ を帰無仮説として [1] と [2] の厳しいほうで判定した。この判定には r_i の真値が正規分布に従うことを仮定し、 t 分布（自由度15=16-1年）を使った。

注意してほしいのは、“統計的有意性=都市効果の証明”ではないことである。なぜなら、有意とは“偏差が偶然の変動に起因する可能性はごく低い”ことを意味するに過ぎず、それが都市の影響によるのか自然要因（地形効果など）によるのかは、別個に判断すべき問題だからである。また、検定方法そのものの限界にも触れておきたい。上記の方法にはそれぞれ制限条件（各ただし書き）があり、このうち [1] の条件は完全には成り立たないし、[2] の条件も満たされる保証はない。また、 r_i の真値が正規分布に従うというのも便宜的な仮定である。一般に統計的な研究は、多かれ少なかれこの種の仮定に頼らざるを得ないものである。もっとも、今回 [1] と [2] で計算した $\sigma(r_i)$ は互いにほぼ一致しており、両方とも一応の信頼性はあると考えてよさそうである。

2.2.4 図の平滑化

r_i を月別あるいは時刻別に求めた場合、その季節変化や日変化をそのまま図示すると不規則な変動が目立ち、全体的な特徴が見えにくい場合がある。これを防ぐため、必要に応じて平滑化を施した。

平滑化は p_i の段階で行った。日変化については、時刻 k ($k=1 \sim 24$) の値を $p_i(k)$ として

$$p_i^*(k) = (p_i(k-1) + 2p_i(k) + p_i(k+1)) / 4 \quad (7)$$

の操作を下記の回数施した。季節変化についても月別値に対して同様の操作をした。その後、2.2.2以降の手順で偏差とその信頼幅を計算した。

平滑化の回数は以下のようにした。

第4図：月について2回、時刻について4回

第5図と第7図：時刻について2回

この操作は、あくまでも図を見やすくするためだけのものなので、上記以外の部分については行わなかった。

2.3 結果

第2図は東京周辺（第1図の破線内）における年間の降水量、 ≥ 1 mm 時間数（=1 mm 以上の降水があった時間数の意味；以下同様）および ≥ 5 mm 時間数の分布を示す。降水量・ ≥ 1 mm 時間数・ ≥ 5 mm 時間数とも、図示範囲の南部～西部で多く北部で少ない。東

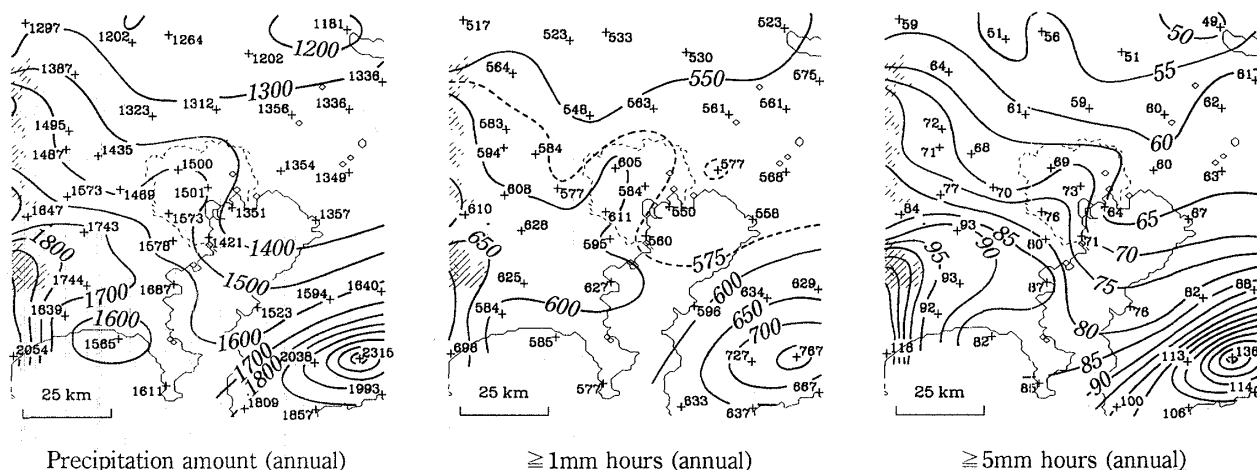


Fig. 2 Distribution of annual precipitation amount (mm) and frequency (hours). The ward area of Tokyo is shown in a dotted line.

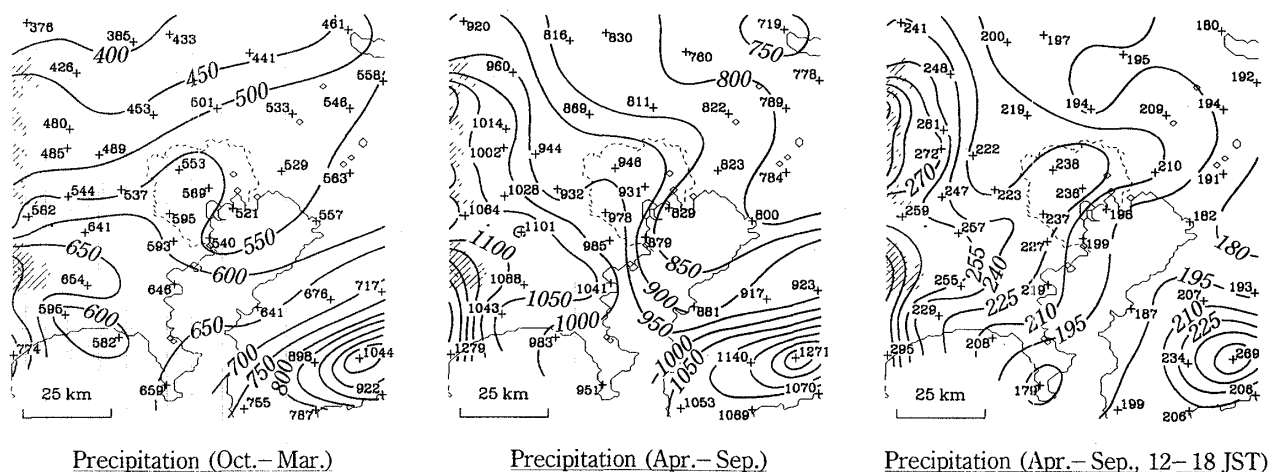


Fig. 3 Distribution of precipitation amount (mm) for each specified period of the year.

京周辺について見ると、大手町から練馬・世田谷にかけて多降水域が南西側から突き出し、この意味で正偏差域になっているのに対し、新木場と羽田は少降水域が北東から延びて負偏差域になっている。

第3図は降水量の分布を10～3月と4～9月の半年ずつに分けて示したもので、4～9月については12～18時のものを併せて示す。降水量分布は季節によって異なり、10～3月は南東部で多く北西部で少ないのに対して、4～9月は北東部で最も少ない。しかし大手町～練馬・世田谷の多降水域と新木場～羽田の少降水域は、両方に共通する。4～9月の12～18時には大手町～練馬・世田谷の正偏差がいつそう大きく、閉じた等値線が描けそうな状態になっている。

第4図は降水量と ≥ 1 mm 時間数について、都区内5地点における偏差の季節・時間変化を示したものである。大手町では暖候期の正午～夕方に降水量偏差が

大きく、その値は10%を超える。これほど明瞭ではないが、他の4地点でも暖候期の午後に降水量偏差が大きい傾向があり、新木場と羽田でも偏差が正になる時期がある。一方 ≥ 1 mm 時間数には暖候期午後のピークはほとんど見られない。これは降水量偏差のピークが主として強い降水によることを示唆する。

第5図は降水量・ ≥ 1 mm 時間数・ ≥ 5 mm 時間数の偏差の日変化をグラフで表したもので、年平均・4～9月・10～3月の結果を示す（10～3月の ≥ 5 mm 時間数は事例が少なすぎるため省略）。誤差棒は[2]の方法で計算したものを表示してある。大手町では4～9月の正午すぎに降水量偏差の極大が見られるが、 ≥ 1 mm 時間数偏差の極大は弱い。逆に、 ≥ 5 mm 時間数は4～9月の正午～夕方に30%に達する極大を持つ。このことから、暖候期午後の偏差ピークは主に強い降水の特性であることが一応裏づけられる。しかし、 ≥ 5 mm

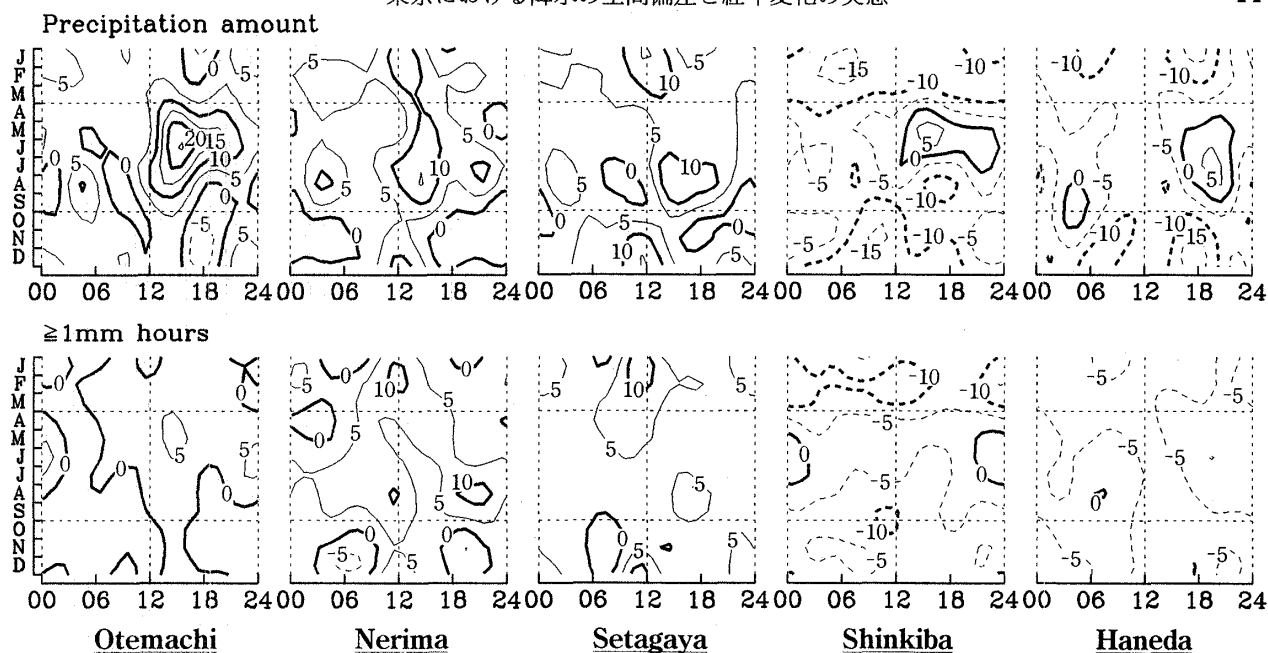


Fig. 4 Seasonal and diurnal variations of spatial anomalies (%) in precipitation amount and ≥ 1 mm hours.

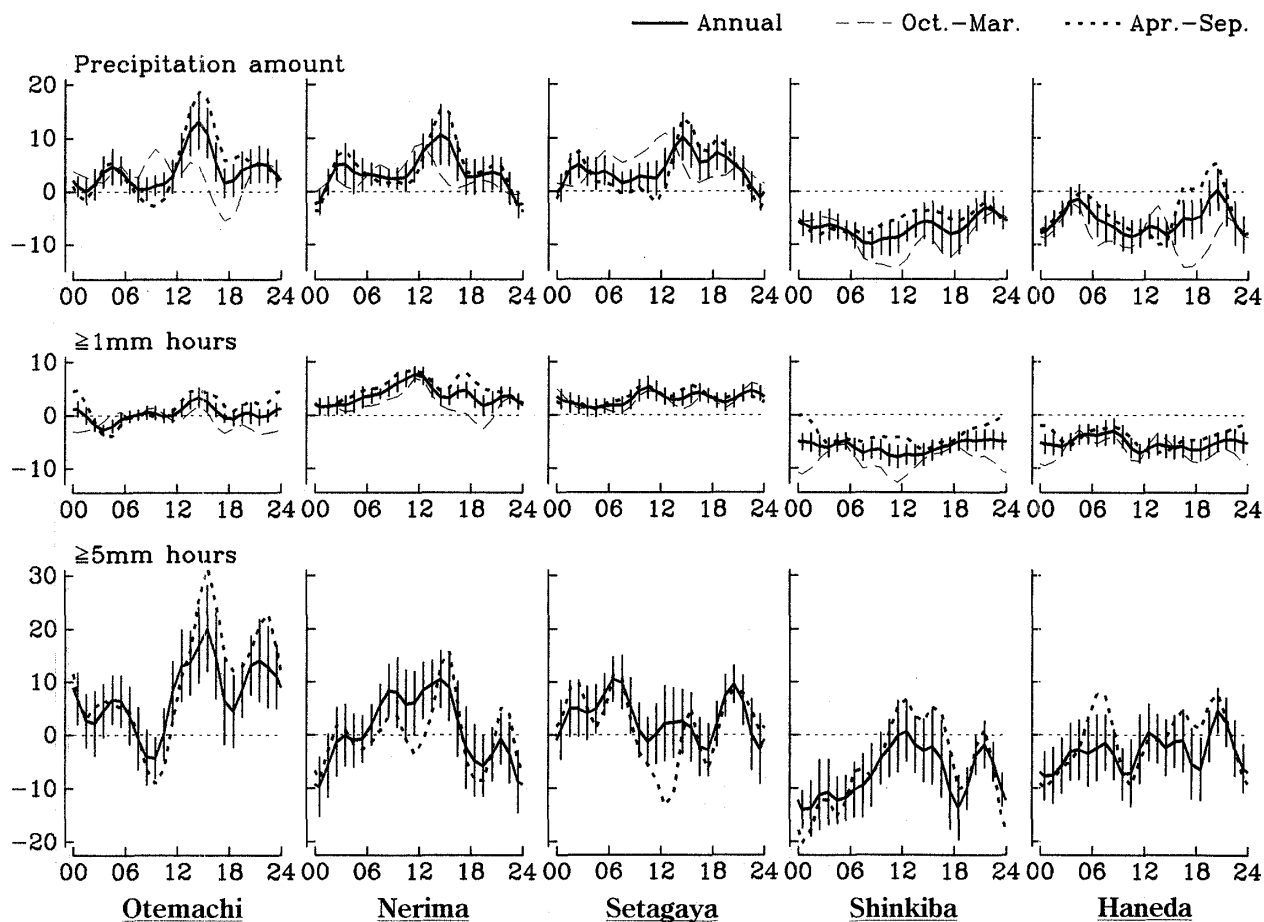


Fig. 5 Diurnal variations of spatial anomalies (%) in precipitation amount and frequency. For annual values, the ranges of standard error are shown in vertical bars.

Table 1 Spatial anomalies (%) of precipitation amount and frequency at stations in Tokyo. Values for 12-18 JST are shown in parentheses together with those for the full day.

	Otemachi	Nerima	Setagaya	Shinkiba	Haneda
Precipitation amount					
Annual	4.0(8.0)	3.7(7.8)	4.1(6.9)	-6.9(-6.7)	-5.2(-6.0)
October-March	2.8(0.8)	2.5(3.3)	4.6(5.0)	-8.8(-11.2)	-8.1(-9.0)
April-September	4.7(12.5)	4.4(10.4)	3.8(8.1)	-5.7(-3.6)	-3.4(-4.0)
Precipitation frequency					
Hours with ≥ 1 mm	0.2(1.7)	3.8(5.2)	3.1(3.4)	-6.0(-7.1)	-5.2(-5.9)
Hours with ≥ 3 mm	3.3(2.3)	1.5(1.2)	2.7(5.1)	-8.1(-7.9)	-7.6(-10.9)
Hours with ≥ 5 mm	7.4(14.7)	0.8(6.3)	3.5(-0.5)	-7.5(-2.1)	-3.1(-0.6)
Hours with ≥ 10 mm	9.7(21.2)	4.3(23.1)	0.6(7.8)	-8.1(0.1)	-4.9(1.6)
Days with ≥ 1 mm	0.2	3.7	3.2	-5.3	-4.5

Significant at levels of : ____ 1% ; ____ 5% ; 10%

時間数の偏差は誤差棒の長さから分かるように信頼性は低く、図示された値を鵜呑みにはできない。その一方、4～9月の午後の極大は降水量偏差については練馬と世田谷、 ≥ 5 mm 時間数の偏差については練馬と新木場でも認められ、都区内各地にある程度まで共通する特性であることが分かる。

以上の結果から、(a)降水量・降水頻度は都心～山の手では正偏差、東京湾岸では負偏差であること、(b)降水量の正偏差は暖候期の正午～夕方に大きい傾向があり、これは主として強い降水(≥ 5 mm/時)の偏差によること、(c)特に都心ではbの傾向が明瞭であることがうかがえる。第1表は偏差を数値で掲げたものである。上記aの正偏差・負偏差やbで示した暖候期午後正偏差の中には、少なくとも5%水準で有意であるものが多く含まれており、これらは“偶然の変動によるとは考えにくい”。次章では、降水偏差に対応する経年変化の有無を探ってみる。

3. 降水の経年変化の解析

3.1 年降水量・降水日数の変化

都区内のアメダス地点のうち、大手町は言うまでもなく、練馬と世田谷も区内観測所を引き継ぐ形で1940年代から年降水量と年間 ≥ 1 mm 日数の資料が得られる。また新木場は区内観測所(砂町)の約2.5 km 南(東京湾寄り)に設けられ、両方を合わせれば1940年代から資料が確保できる。そこで、1941年以降の区内観測資料と1994年までのアメダス資料を合わせ、上記2要素の経年変化を調べた。

3.1.1 資料と対象地点

対象領域を34°30'～36°30'N および139°E 以東とし、

区内観測所・アメダス地点の中から次の2条件を満たす35組を選んで時間的に連続したデータセットを作った。資料源として中央气象台と気象庁の「雨量報告」等を使った。

- I. 区内観測所とアメダス地点の距離が3 km 未満。
- II. 資料の欠損率が20%未満 (=10年以下)。

どちらもかなり甘い条件であり、I については資料の均質性に不安がある(大手町・練馬・世田谷は移転がないのでこの心配は少ない)。しかし十分な対象地点数を確保するためには、この程度の条件で満足せざるを得なかった。これは今回の解析の限界として受け入れるほかなかろう。

3.1.2 経年変化率の計算

資料の欠損が多いことと、降水の年々変動が大きいことを考慮し、まず都区内を除く31地点を対象として主成分分析で広域的な変動を求め、これを基にして経年変化率を計算した。具体的には以下の手順によった。

1. 地点 j ($j = 1 \sim 31$) における年 n ($n = 1941 \sim 1994$) の観測値を p_{nj} 、その経年平均を $\langle p_j \rangle$ とし、 $\langle p_j \rangle$ からの増減量 $z_{nj} = p_{nj} - \langle p_j \rangle$ の地点間相関に基づいて主成分分析をした。

2. そのうち上位 K 成分を取り入れた最小2乗条件

$$\sum_{n=1941}^{1994} [p_{ni} - a_i - b_i n - \sum_{k=1}^K f_{nk} c_{ik}]^2 \rightarrow \text{最小} \quad (8)$$

で経年変化を表現した。ここで i は都区内地点のどれかであり、経年変化率は b_i で与えられる。式(8)は第 K 主成分までで説明できない部分を地点 i に特有の成分と見なしてそのトレンドを計算する形になっている。

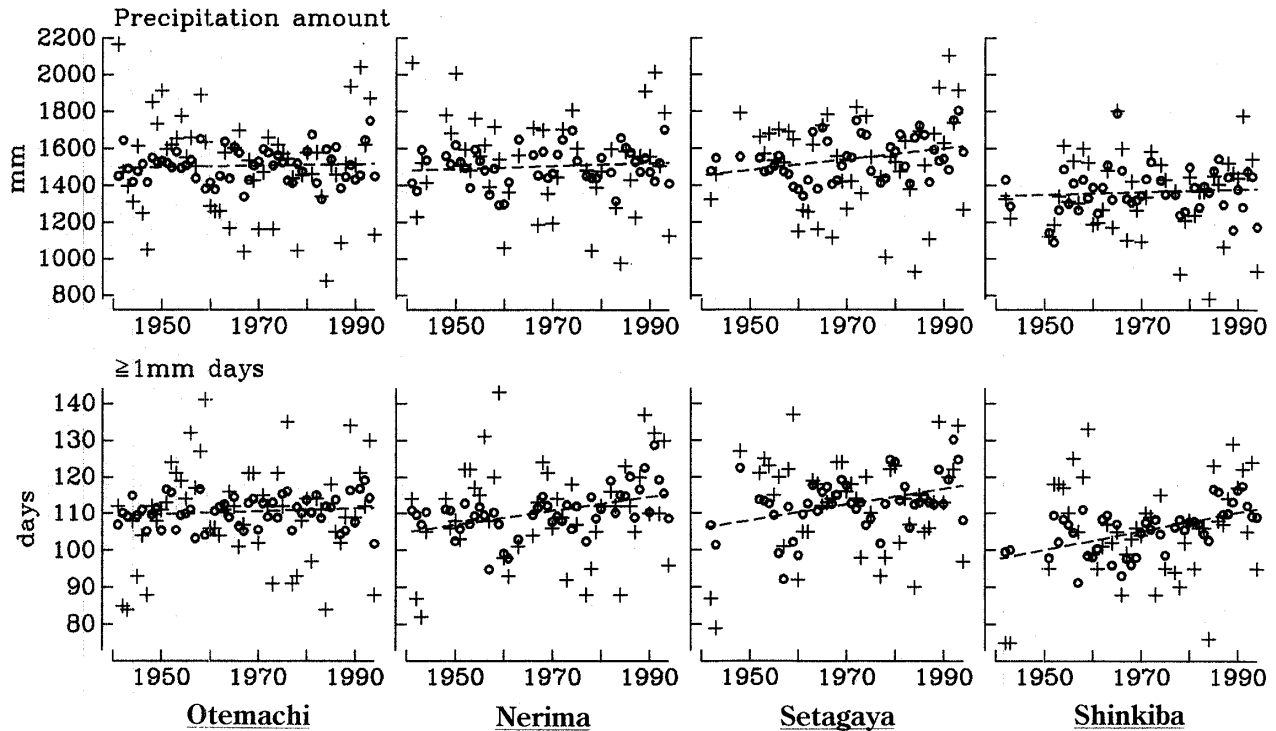


Fig. 6 Long-term changes in annual precipitation amount and precipitation days. The raw values (p_{ni} in Eq. (8)) are shown in “+”, and those filtered out of ambient variations ($p_{ni} - \sum f_{nk} c_{ik}$, where $K=4$) are shown in “O”. Dashed lines indicate the linear trend ($a_i + b_i n$).

Table 2 Linear trends of annual precipitation amount (mm/(50 years)) and precipitation days (days/(50 years)) at stations in Tokyo.

	Otemachi		Nerima		Setagaya		Shinkiba	
	Amount	Days	Amount	Days	Amount	Days	Amount	Days
$K=2$	16	1.3	44	<u>8.7</u>	<u>152</u>	<u>10.8</u>	37	<u>11.9</u>
$K=3$	24	2.0	46	<u>9.6</u>	<u>153</u>	<u>10.8</u>	37	<u>12.6</u>
$K=4$	20	2.0	41	<u>9.6</u>	<u>145</u>	<u>10.8</u>	38	<u>12.7</u>
$K=6$	10	1.9	42	<u>9.8</u>	<u>155</u>	<u>10.5</u>	47	<u>13.3</u>

Significant at levels of : ____ 1% ; ____ 5%.

る。 K としては 2～6 の各値を与え、トレンドの計算値が K にどの程度左右されるかを調べた。

3.1.3 結果

第 6 図は都区内 4 地点の降水量・ ≥ 1 mm 日数の経年変化とそのトレンドを示したものである。このうち “+” は生データ (式 (8) の p_{ni}) , “O” は $K=4$ までの変動を除いたもの ($p_{ni} - \sum f_{nk} c_{ik}$) , 破線はそのトレンド ($a_i + b_i n$) を表す。第 2 表は経年変化率 (式 (8) の b_i 値) を K の値別に示す。これらによると、降水量は世田谷で 150 mm/(50 年) 程度の有意な増加傾向があるが、他の地点では変化は小さい。一方 ≥ 1 mm 日数は大手町では変化が小さいが、他の 3 地点では 10 日/(50 年) 程

度の増加がある。これらの結果は K の値にはほとんど影響されない。

なお降水量の統計においては、観測値そのものではなくその低次ベキが使われることがある。そこで、降水量や ≥ 1 mm 日数の平方根と 3 乗根を対象にした解析を試みたが、結果は上記のものとはほとんど差がなかった。また主成分分析の際に z_{nj} の地点間相関ではなく共分散を使っても、結果はほとんど変わらなかった。

3.2 降水量の日変化形の時代差

第 2 章の結果によれば、降水量偏差は暖候期の正午～夕方に大きい。この日変化特性を経年変化の面から

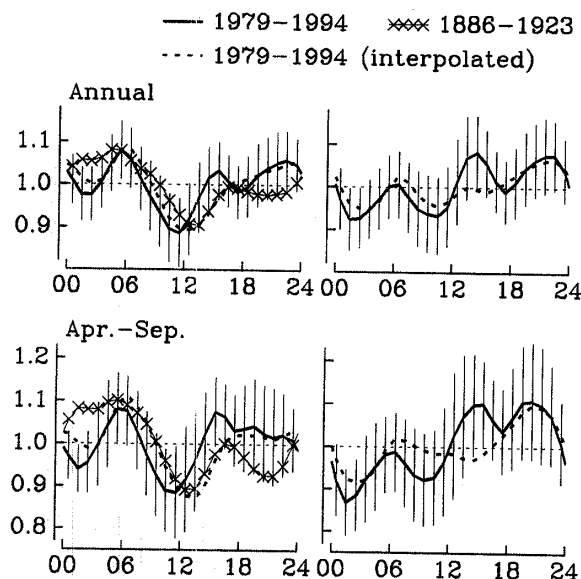


Fig. 7 Comparison of diurnal precipitation variations (normalized by the daily mean) at Otemachi obtained from : ① observation for 1979-1994, ② observation for 1886-1923, and ③ spatial interpolation for 1979-1994. The left part shows each of ①, ② and ③. The right part shows the ratios ① ÷ ② and ③ ÷ ②. For ① and ① ÷ ②, the ranges of standard error are shown in vertical bars.

検証するため、大手町における降水量の日変化形を明治～大正時代と比べてみた。資料としては“中央気象台年報”に掲載された時刻別降水量の月合計値を使った。資料が入手できたのは1886～1923年である。なお観測点は1922年まで現在地の約600 m 西であった(従って本当は大手町ではないが、便宜上「大手町」と呼ぶ)。

第7図の左列は①1979～1994年の降水量、②1886～1923年の降水量、および③1979～1994年の周辺21地点からの内挿値を示す。図は日平均値が1になるように描いてある。①②③とも、正午ごろに極小を持ち、夕方と明け方に極大を持つ。これは沿岸域に一般的な日変化である(Fujibe, 1988a)。しかし①は②と比べて午後の値が数%大きく、午前中の値が小さい。③も②に比べて夕方～夜半は大きめ、夜半すぎと正午前は小さめである。第7図の右列は、②との比を見やすくするため①÷②と③÷②を示したもので、やはり日平均値を1としてある。図の特徴は左列と同様である。このように、近年の都心では明治～大正時代と比べて午後の降水量の比率が高まる傾向がある。第2章の結果と合わせると、都心では過去と比べても周囲と

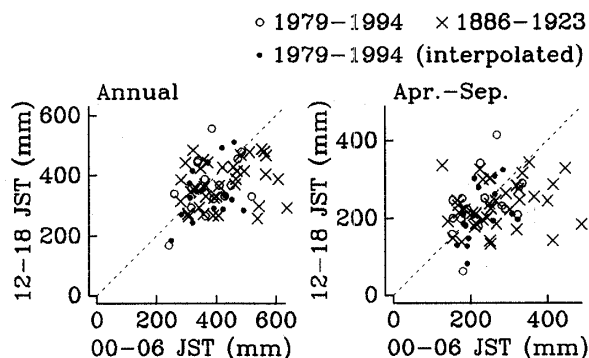


Fig. 8 Scatter diagrams of precipitation amount at Otemachi for specified hours of the day of each year. Thin dotted lines indicate the $y=x$ relation.

比べても、正午～夕方降水量が多いことになる。

しかし降水量の日変化形は年々の変動が大きく、①と②の間に決定的な差があるとまでは言えない。第8図は12～18時の降水量(= p_1)を縦軸、00～06時の降水量(= p_2)を横軸にとり、①～③における毎年の値をプロットしたものである。第7図の結果によれば①の値が②よりも左上側に分布することになるが、第8図においては年々のばらつきが大きく、①と②の分布の違いを識別するのは難しい。

①と②の日変化形の違いを統計的に評価するため、各期間の $p_1 \div p_2$ 比について2.2節2.2.3の方法で標準偏差を求め、その平均値の差を検定してみた。その結果は、 $p_1 \div p_2$ 比の差は片側検定で10%水準をかわうじて満たすというものだった。別の方法として、Wilcoxonの検定(Kendall and Stuart, 1973)を行ってみた。これは、2つの母集団が同じ確率分布に従う場合、両者の平均値に差があるかどうかを調べるものである。①と②の $p_1 \div p_2$ 比は、同じ地点(大手町)の降水量の昼夜比であるため同じ確率分布に従うことが期待でき、Wilcoxon 検定の前提を満たす。この方法によってもやはり、 $p_1 \div p_2$ 比の差は片側検定でぎりぎり10%水準を満たすという結果になった。従って、大手町の降水日変化形が明らかに変化したとは言えず、“変化した可能性がある”という判断にとどまらざるを得ないのが現状である。

4. 議論

今回見出された事実に基づいて、東京の降水偏差に対する都市効果を議論する。すでに第1章や2.2節2.2.3で触れたように、降水の空間的・時間的変動には

都市効果だけでなく自然要因も無視できない。従って、都市効果の有無を判断する際には、偏差や経年変化率の統計的有意性だけでなく、従来の研究例やヒートアイランドの物理的性質との整合性にも注意を向け、慎重に検討する必要がある。

今回見出された特徴の1つは、東京都心を中心として暖候期の正午～夕方に強い降水の頻度偏差が大きいことである。この時間特性は、強い降水や雷に関する国外のいくつかの報告例（第1章参照）と一致する。この一致は今回の結果を都市効果によるものと解釈する上で有利な点である。

上記の“強い降水”は、主に対流性降水と見なすことができよう。対流性降水の偏差が正午～夕方に大きいことは、ヒートアイランドの性質に合致する。日中のヒートアイランドは混合層内への熱拡散のため、夜間に比べて気温偏差は小さいが、気温偏差を高さで積分したもの（熱含量偏差）は大きく、風の収束も強いと考えられるからである（Yoshikado, 1992; Fujibe, 1994）。こうした局地的収束は水蒸気の蓄積をもたらし、対流性降水を起りやすくすると考えられる（木村, 1994）。

東京では最近、局地的な大雨が多いようだとと言われることがあり、実際に暖候期の午後には孤立した対流性エコーの発生をしばしば経験する。東京のヒートアイランドに伴う収束風の存在は確認されており（藤部・浅井, 1979; Fujibe, 1988b）、これが対流雲の発達を促すというシナリオには一応の現実性がある。しかし、個々の降水事例をヒートアイランドと直接関連づけても、あまり意味があるとは思えない。なぜなら、局地的降水は都市に限らずどこにでも起り得るもので、ヒートアイランドはせいぜいその発達促進因子の1つに過ぎないからである。この点で今回、東京における対流性降水の多発傾向が統計的な面から示唆されたのは意味深いと言えよう。

空間分布の点から見ると、今回の結果では都心～山の手が正偏差域になっているが、国外の報告例はむしろ都市の風下側（主に東側）の増加を示したものが多く、この違いは今回の結果を否定的に解釈する理由になり得るかも知れない。しかし五大湖西岸のChicagoとMilwaukeeでも都市の東側（湖側）で降水や雷が少ない傾向があり、その理由として湖面が相対的に冷たいことによる下層大気の安定化が推測されている（Changnon, 1980; Westcott, 1995）。東京の場合も東京湾による同様の影響が考えられる。また海風とヒ-

トアイランドの効果が重なると、都市域のやや内陸側に強い収束が起こる可能性がある（吉門, 1990; Yoshikado, 1992）。これらの点から見て、降水の増加傾向が都心～山の手を中心として現れても不思議ではない。むしろ問題なのは、降水の日変化形の経年変化を確認しきれない（3.2節）など、都市効果を確認する統計事実がまだ不足していることである。今後も、解釈が先走ることのないよう、事実をよく見極めていくべきであろう。

山の手（練馬・世田谷）では弱いものを含めた降水全体の頻度が年間を通じて多いという特徴があり、層状性降水の正偏差が示唆される。山の手では降水日数の経年増加傾向も認められるので、降水偏差が都市の影響である可能性は否定できない。しかし他の都市の研究例（第1章参照）を見ると、弱い（ものを含む一般の）降水増加は対流性降水の場合ほど普遍的な特徴ではなく、今回の結果を何らかの都市効果（摩擦や大気汚染による凝結核など）で説明できるかどうか分らない。一方、関東平野の南西部から東京湾の北にかけて北東方向にエコーが延びることは経験上よくあり、そこに何らかの地形効果が働いている可能性もある。また、自然の気候変動に伴ってある地域の降水分布が経年変化するのもあり得ないことではない（例えばPittock, 1977; Lowry and Probáld, 1978）。降水現象の複雑さを考えれば、山の手降水偏差や経年変化を都市効果によるものと断定するのは尚早であろう。

ついでながら、今回の話は“弱い……”とは言っても ≥ 1 mm/時あるいは ≥ 1 mm/日であり、吉野(1957, 1977)の言う微雨日数（0.0mmあるいは0.1~1 mm）とは別である。吉野（1957, 1977）は1970年以前の資料を使って国内各都市の微雨日数の増加を示したが、1970年代以降の状況は観測方法の変更のため確かめられない。日本の都市では最近になって相対湿度の低下や霧日数の減少が進んでおり（吉野, 1977; 気象庁, 1994）、微雨日数も減った可能性がある。

東京湾沿岸の負偏差については、都市効果は考えにくい。なぜなら、経年的な降水減少傾向は検出されず、降水の少ない状態は数十年前から続いていた可能性が強いからである。

因果論はさておき、降水偏差がせいぜい10%のオーダーであることは重要である。なぜならこの事実は、仮に都市効果が本当だとしても、それを誇大に考えるべきではないことを示すからである。また“降水偏差”

と言っても閉じた等値線が存在するわけではなく、非一様な降水分布の中の部分的な歪みに過ぎないこと(第2, 3図)も見落とせない。文献の中には都市の降水偏差として大きな数値を掲げたものもあるが、それは厳密な検証を経た値というより、単に象徴的な数字である場合が少なくないことを念頭に置くべきであろう。

以上をまとめると、東京都区内の降水偏差の一部は都市効果によるものかも知れず、とりわけ暖候期午後の強い降水の正偏差はヒートアイランドによる対流性降水の増加を反映している可能性があるが、確実な結論を導くまでにはなお慎重な見極めが必要である。よりきめの細かい調査としては、風向別あるいは気圧配置別の解析(Vogel and Huff, 1978; Changnon *et al.*, 1991; Lowry and Probáld, 1978)が考えられる。しかしアメダスの分解能ではこうした解析の有効性に限界があり、むしろ矢島ほか(1996)のようにレーダーなど空間分解能の高い資料が有望かも知れない。

なお今回の解析対象を東京都区内にしたのは主として便宜的な理由による。これ以上細かいスケールはアメダスでは捉えられず、もっと大きいスケールになると都市効果と自然要因との判別がいつそう難しいからである。しかし最近の研究によれば、暖候期の昼間には東京のヒートアイランドが都区部の範囲を大きく超えて関東平野の内陸域まで及ぶ可能性が示されている(高橋・木村, 1991; 気象庁, 1994; Fujibe, 1994)。こうした広域のヒートアイランドが関東平野の降水活動にどんな影響を及ぼすのか、今後の研究課題として興味深い。

謝 辞

アメダス資料は気象庁統計室が作成した磁気テープ資料(うち一部は気象研究所電子計算機室保管のもの)に依った。一部の図の作成には気象研究所の HITAC S-3800計算機を使った。

参 考 文 献

- Balling, R. C. Jr. and S. W. Brazel, 1987: Recent changes in Phoenix, Arizona summertime diurnal precipitation patterns, *Theor. Appl. Climatol.*, **38**, 50-54.
- Changnon, S. A. Jr., 1980: Evidence of urban and lake influences on precipitation in the Chicago area, *J. Appl. Meteor.*, **19**, 1137-1159.

- Changnon, S. A. Jr. ed., 1981: METROMEX: A review and summary, *Meteor. Monogr.*, (40), Amer. Meteor. Soc., 181pp.
- Changnon, S. A. Jr. and F. A. Huff, 1986: The urban-related nocturnal rainfall anomaly at St. Louis, *J. Climate Appl. Meteor.*, **25**, 1985-1995.
- Changnon, S. A., R. T. Shealy and R. W. Scott, 1991: Precipitation changes in fall, winter, and spring caused by St. Louis, *J. Appl. Meteor.*, **30**, 126-134.
- Clodman, S. and W. Chisholm, 1996: Lightning flash climatology in the southern Great Lakes region, *Atmos.-Ocean*, **34**, 345-377.
- 大後美保, 長尾 隆, 1972: 都市気候学, 朝倉書店, 214 pp.
- Fujibe, F., 1988a: Diurnal variations of precipitation and thunderstorm frequency in Japan in the warm season, *Pap. Meteor. Geophys.*, **39**, 79-94.
- Fujibe, F., 1988b: Weekday-weekend differences of urban climates. Part 3: Temperature and wind fields around Tokyo and Osaka, *J. Meteor. Soc. Japan*, **66**, 377-385.
- Fujibe, F., 1994: Long-term falling trends of pressure over the Kanto plain as evidence of increasing heat content in the lower atmosphere in the daytime of the warm season, *J. Meteor. Soc. Japan*, **72**, 785-792.
- 藤部文昭, 浅井富雄, 1979: 関東地方における局地風に関する研究, 第2部: 東京のヒートアイランドに伴う地上風系, *天気*, **26**, 697-701.
- Hald, A., 1952: *Statistical Theory with Engineering Applications*, John Wiley & Sons, 783pp., 498-499.
- 原田 朗, 1982: 大気汚染と気候の変化, 東京堂出版, 223pp.
- Huff, F. A., 1995: Characteristics and contributing causes of an abnormal frequency of flood-producing rainstorms at Chicago, *Water Resour. Bull.*, **31**, 703-714.
- Huff, F. A. and J. L. Vogel, 1978: Urban, topographic and diurnal effects on rainfall in the St. Louis region, *J. Appl. Meteor.*, **17**, 565-577.
- Jauregui, E. and E. Romales, 1996: Urban effects on convective precipitation in Mexico City, *Atmos. Environ.*, **30**, 3383-3389.
- 甲斐憲次, 浦 健一, 河村 武. 朴(小野)恵淑, 1995: 東京環状八号線道路付近の上空に発生する雲(環八雲)の事例解析—1989年8月21日の例—, *天気*, **42**, 417-427.
- Kendall, M. G. and A. Stuart, 1973: *The Advanced Theory of Statistics* (3rd ed.), Vol. 2, Griffin, 723pp.

- 木村富士男, 1994: 局地風による水蒸気の水平輸送—晴天における日照時間の地形依存性の解析—, 天気, 41, 313-320.
- 気象庁, 1994: 近年における世界の異常気象と気候変動—その実態と見通し—(V), 気象庁, 444pp., 303-313.
- 北出寿江, 1980: 人間活動と降水量の変化, 気候変動の実態(河村 武編), 古今書院, 289pp., 220-230.
- Klaus, D., E. Jauregui and W. Lauer, 1983: Stadtbedingte Niederschlagseffekte im Großraum von Mexiko City, Arch. Meteor. Geophys. Bioclimatol., B33, 275-288.
- Landsberg, H. E., 1981: The Urban Climate, Academic Press, 275pp.
- Lowry, W. P. and F. Probáld, 1978: An attempt to detect the effects of a steelworks on precipitation amounts in central Hungary, J. Appl. Meteor., 17, 956-975.
- Pittock, A. B., 1977: On the causes of local climatic anomalies, with special reference to precipitation in Washington State, J. Appl. Meteor., 16, 223-230.
- Sanderson, M. and R. Gorski, 1978: The effect of metropolitan Detroit-Windsor on precipitation, J. Appl. Meteor., 17, 423-427.
- 関口 武, 1970: 都市気候学, 天気, 17, 89-96.
- 高橋俊二, 木村富士男, 1991: 都市気候を表現する局地気候モデルの開発と応用, 平成3年度気象研究所研究発表会誌, 44-51.
- Vogel, J. L. and F. A. Huff, 1978: Relation between the St. Louis urban precipitation anomaly and synoptic weather factors, J. Appl. Meteor., 17, 1141-1152.
- Westcott, N. E., 1995: Summertime cloud-to-ground lightning activity around major Midwestern urban areas, J. Appl. Meteor., 34, 1633-1642.
- 矢島 啓, 池淵周一, 中北英一, 1996: 大阪湾周辺における夏期の降雨生起特性, 京大防災研年報, 39B-2, 271-284.
- Yamashita, S., 1990: The urban climate of Tokyo, Geogr. Rev. Japan, 63B, 98-107.
- Yonetani, T., 1982: Increase in number of days with heavy precipitation in Tokyo urban area, J. Appl. Meteor., 21, 1466-1471.
- Yonetani, T., 1989: Study of the urban effects on the occurrence of convective precipitation, Report of the National Research Center for Disaster Prevention, (44), 1-59.
- 吉門 洋, 1990: 海岸の都市が海風と汚染質拡散に与える影響の数値実験, 天気, 37, 681-688.
- Yoshikado, H., 1992: Numerical study of the daytime urban effect and its interaction with the sea breeze, J. Appl. Meteor., 31, 1146-1164.
- 吉野正敏, 1957: 東京都区内における雨の分布と微雨日数の増加, 天気特別号, 日本気象学会創立75周年記念論文集, 121-125.
- 吉野正敏, 1961: 小気候, 地人書館, 274pp.
- 吉野正敏, 1977: 日本および外国の諸都市における気候の変化, 気象研究ノート, (133), 1-25.

Spatial Anomalies and Long-Term Changes of Precipitation in Tokyo

Fumiaki Fujibe*

* Forecast Research Department, Meteorological Research Institute, Tsukuba 305-0052, Japan.

(Received 15 April 1997 ; Accepted 18 August 1997)

Abstract

Spatial distribution of precipitation in and around Tokyo were studied in search for urban anomaly by using data from the AMeDAS raingauge network for 16 years (1979-1994). The anomalies at five stations in Tokyo were defined by the departure from a quadratic interpolation based on 21 stations outside the city. Also, the long-term precipitation changes were analyzed by

using data prior to the deployment of AMeDAS raingauges. The findings are summarized as follows : (a) Stations in the central and inland area of Tokyo show a positive anomaly of precipitation, while those in the coastal area of the city show a negative anomaly. (b) The positive precipitation anomaly tends to be enhanced in the early afternoon of the warm season, reflecting the large anomaly in the frequency of heavy precipitation (≥ 5 mm/hour). (c) The feature in (b) is most conspicuous at the station in the central area of the city, where the diurnal variation pattern may have changed during the 20th century toward a higher percentage of precipitation in the afternoon than in other time of the day. (d) The stations in the inland area of the city are characterized by positive anomalies in the frequency of precipitation in general (≥ 1 mm/hour and ≥ 1 mm/day), as well as a long-term increasing trend in the number of precipitation days (≥ 1 mm/day). Part of these anomalies and changes may be attributable to urban effects, although a conclusive judgment will call for further evidence.

第14回 IGBP/GAIM 研究会のお知らせ

下記の日程で第14回の GAIM 研究会を開催します。研究会では、地球圏と生物圏との間の相互作用を研究されておられる方の講演を募集いたします。希望者は、平成10年2月28日(土)までに、講演題目を FAX か E-mail でご連絡下さい。

日 時：1998年3月30日(月) 9時～13時

場 所：京都大学・理学部2号館大講義室 (1F)

参加費：無料

講演申込み先：

〒305-0004 つくば市天王台1-1-1

筑波大学生物科学系

及川武久

TEL & FAX : 0298-53-6661

E-mail : toecolog@sakura.cc.tsukuba.ac.jp

*IGBP/GAIM (日本版) のホームページが開設されました。

<http://oak.biol.tsukuba.ac.jp/~oikawa/gaim.html>

どうぞご利用ください。

なお、<http://gaim.unh.edu> にも GAIM 関連の情報が公開されています。興味をお持ちの方はご参照ください。