

東京23区における夏季高温日午後の短時間強雨に先立つ 地上風系の特徴

藤 部 文 昭*・坂 上 公 平**・中 鉢 幸 悦**・山 下 浩 史***

要 旨

東京23区で夏の高温日の午後に起こる短時間強雨について、その発生に先立つ地上風系の特徴や風系と降水系との対応関係を、7年間のアメダス資料と6年間の東京都大気汚染常時監視測定局の資料および4年間のレーダーエコー資料を使って調べた。解析対象は23区内で日最高気温が30℃以上になり午後に20 mm/時以上の降水が観測された場合とした。このような例は7年間に16件あり(台風時の1例を除く)、そのうち12件では強雨発生に先立って鹿島灘沿岸から吹く東寄りの風と相模湾沿岸から吹く南寄りの風とが東京付近で収束するパターン(E-S型)になっていた。詳しく見ると、東京付近には10~20 km スケールの収束域が1つないし複数個あり、その後降水系が発達した場所はこれらのうちのどれかに対応していた。E-S型の風系は、晴天日でも東風が吹きやすい気圧配置のもとでは現れることがあるが、強雨日は晴天日に比べ対流圏下~中層が湿っていて、K-index や可降水量が大きい傾向があった。

1. はじめに

東京では1時間に数十 mm 以上の雨によって浸水や道路冠水が起こることがあり、“都市型水害”として問題にされている。1999年7月21日には100 mm を超える雨のため地下室が水没し、死者を出す事態になった。2000年7月4日にも一部の地点で100 mm を超す豪雨が発生した。

これら2件のように、東京の短時間強雨は盛夏期の午後に、熱的局地循環が発達する状況下で起きることをよく経験する。こうした短時間強雨を取り上げた文献はいくつかあり、その中には強雨の発生に先立つ収束線の存在など降水系の発達に影響し得る局地風系の特徴を記述したものも見られる(Yonetani, 1989; 神田ほか, 2000など)。しかし、それらの対象事例はそれぞれ1ないし数件であり、強雨発生日の風系の一般的な特徴を集約するには至っていない。また、風系のス

ケールに関する視点が必ずしも明確でなく、強雨域付近の狭い範囲には目が向けられても、より広く関東平野全体から見た風系の特徴の把握は比較的手薄であった。関東平野の午後の風系(海風)は総観場の気圧分布に応じて多様な形態をとることが知られている(藤部, 1993など)が、これらと比較して強雨発生日の風系にどんな特徴があるのか、きちんと理解できているとは言えない。

一方、東京の豪雨はしばしば都市ヒートアイランドに関連づけて論じられてきた。この視点に基づく研究としてはYonetani (1982, 1983, 1989)による一連の解析的・数値的研究のほか、近年の統計的研究(藤部, 1998, 2001; 佐藤・高橋, 2000)があり、夏の午後に東京で強雨の発生頻度が増す傾向が示唆されている。しかし、これらはYonetani (1989)の3事例を除けば大雨や強雨回数の単純な統計に基づくものであり、強雨頻度の増加傾向が個々の降水系の振舞とどう結びつくのか、よく理解されずに残されている。

本研究では、東京に発生する短時間強雨と熱的に誘起される局地風系との関連を明らかにする一環として、23区で夏の高温日の午後に起こった短時間強雨の事例16件を7年間の資料から抽出し、風系の特徴や降

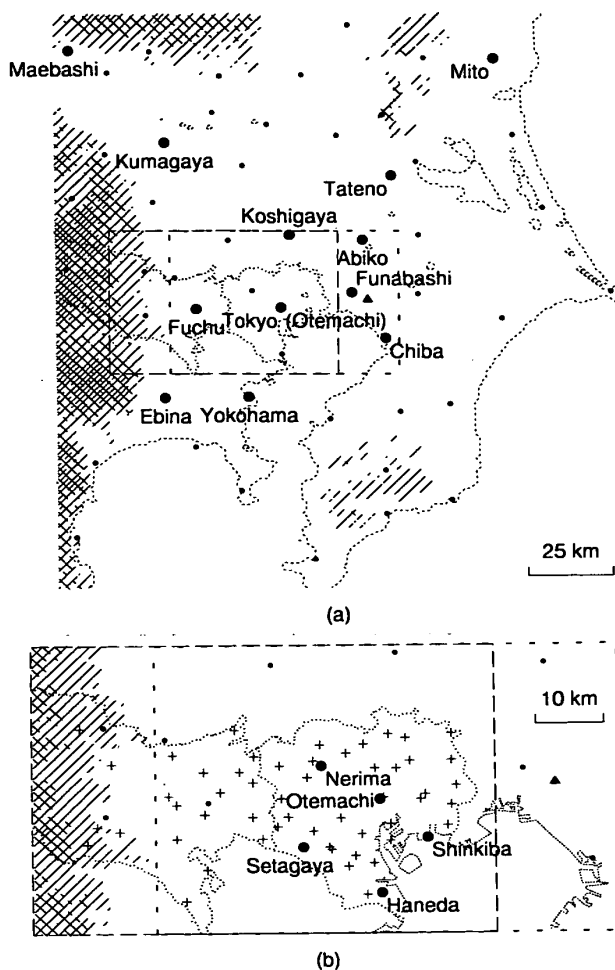
* 気象研究所予報研究部, ffujibe@mri-jma.go.jp

** 東京管区気象台(現所属: 気象庁予報部)。

*** 気象庁予報部。

—2001年11月12日受領—

—2002年2月27日受理—



第1図 解析対象領域 (a: 関東平野全域, b: 東京付近)。●は本文中に出てくる地点, ・はその他のアメダス地点 (降水量のみの観測点は除く), bの+は東京都測定局。長い破線で囲んだ領域は第5図や第10図a~c, 第11図の範囲, 短い破線で囲んだところは第10図d~fの範囲。点線は海岸線および東京23区と東京都の範囲, 斜線域は濃さの順に海拔150 m, 300 m, 600 m, 1200 m以上の領域。なお船橋の観測点は1999年8月3日に約5 km 東南東へ移動した (図の▲)。

水系との対応関係を調べた。その際には、まず関東平野全体にわたる広域的な特徴をアメダス資料を使って把握し、次に東京都内の細かい風系分布を東京都の大気汚染常時監視測定局 (以下「東京都測定局」) の資料を利用して捉えるようにし、その上で風系と降水系との空間的・時間的な対応関係を見た。さらに、強雨が起った日の風系と晴天日に吹く海風との類似点や相違点について検討した。

なお、以下の文中では東京都のうち区部を「(東京)23区」、それ以外の地域を「多摩」と表記し、「東京」

という語はその両方を合わせて、あるいは特に区別を要しない場合に使う。また、千代田区大手町にある気象庁本庁に設置されたアメダス地点は公式名は「東京」であるが、混乱を避けるため「大手町」と表す。

2. 強雨日の選択方法

解析に使った地点の位置を第1図に示す。アメダスについては10分値のCD-ROMが利用できる1994以降を対象にし、2000年まで7年間の資料を使った。降水量は0.5 mm, 気温は0.1°C, 風速は1 m/s単位であり、風向は16方位である。23区内の観測点のうち上記期間を通じて資料が得られる地点は、降水量については5つ (大手町・練馬・新木場・世田谷・羽田), 気温については3つ (大手町・練馬・新木場) である。東京都測定局に関しては東京都環境局作成のCD-ROMに収録された1995~2000年の毎時資料を使った。気温は0.1°C, 風速は0.1 m/s単位であり、風向は16方位である。また、降水系の形状やその時間変化を的確に把握できるよう、レーダーエコーの資料を利用した。これについては東京管区気象台で収録した1997~2000年の10分ごとの合成エコー資料を使った。

まず上記7年間の5~9月を対象にして23区の短時間強雨事例をすべて抽出した。その定義は、上記5つのアメダス地点のどこかで1時間降水量 (連続する6つの10分間降水量の合計値, 以下 P_{hour}) が20 mm以上であることとした。20 mmというのは、対象を強雨に絞りつつ、統計的な解析に耐えうるだけの事例数を確保できるように設定した値である。そして、5地点すべてで $P_{\text{hour}} < 20 \text{ mm}$ の状態が12時間続いた時に、1件の強雨事例が終わったものと見なした。この方法により45事例が抽出された。

これらの中には台風など総観規模擾乱の影響下のものも含まれ、昼間に昇温し熱的局地循環が発達する状況下で起こった強雨は20件弱である。そこで、昇温した日の午後に起こった事例を選び出すため、以下の3条件を設定した。

- [1] 大手町・練馬・新木場のどこかで日最高気温 (10分ごとの気温のうちの最高値) が30°C以上。
- [2] 強雨開始時刻が12~21時 (日本時間, 以下同様)。
- [3] 強雨終了時刻が24時以前。

ここで強雨開始時刻は、その事例中の最初の $P_{\text{hour}} \geq 20 \text{ mm}$ 期間中に、初めて10分間降水量が3 mmを超えた時点の10分前と定義した。終了時刻は、事例中の最後の $P_{\text{hour}} \geq 20 \text{ mm}$ 期間中に、最後に10分間降水量が3

第1表 解析対象になった16件の諸データ.

年月日	最大1時間 降水量(mm)	開始 時刻	終了 時刻	≥1mm≥10mm 地点数 ¹⁾		前線 位置 ²⁾
1994.8. 5	44.5(羽田)	20:30	22:10	36	12	東
1994.9. 2	31.0(大手町)	16:10	17:20	32	18	東
1995.8. 2	28.5(世田谷)	15:50	17:10	17	6	北
1995.8.22	38.0(世田谷)	13:50	23:30	46	20	直
1997.8.23	65.0(世田谷)	19:20	23:10	17	9	東
1997.9. 3	54.5(世田谷)	20:10	21:30	35	19	北
1998.8. 6	32.0(世田谷)	15:30	16:10	46	9	北
1999.7.21	111.5(練馬)	15:10	17:30	56	22	北
1999.7.22	39.5(練馬)	15:00	15:40	24	6	北
1999.8.24	64.0(練馬)	19:00	20:00	35	10	北
1999.8.29	61.5(世田谷)	18:00	21:00	18	6	北
2000.7. 2	20.5(世田谷)	18:50	19:30	38	19	無
2000.7. 3	20.5(世田谷)	15:20	17:00	10	4	無
2000.7. 4	104.0(新木場)	17:20	19:00	53	23	無
2000.8. 7	67.5(大手町)	18:00	19:10	19	9	無
2000.8.16	20.0(練馬)	19:10	19:40	20	8	無

¹⁾ 関東平野内にある海拔100 m 以下の63地点のうち、当日12~24時の降水量が1 mm あるいは10 mm 以上であった地点数.

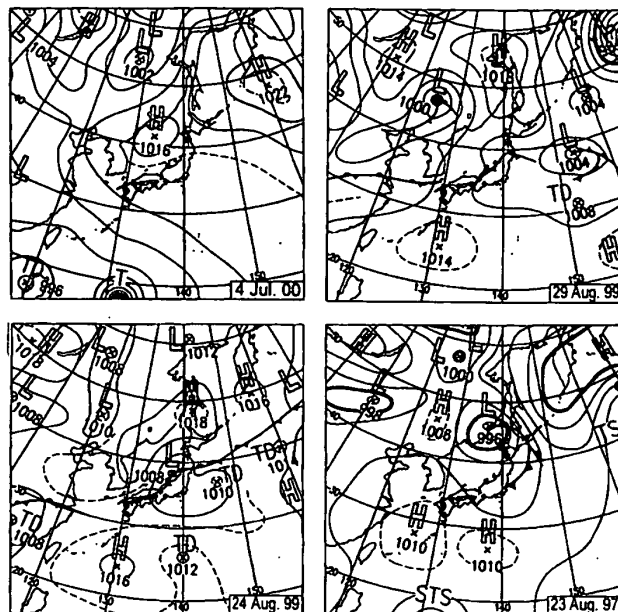
²⁾ 09時の地上天気図に描かれた前線の位置. 「北」は関東の北側を東西に延びる状態, 「直」は関東を東西に延びる状態, 「東」は寒冷前線の先端が関東付近に達する状態.

mm を超えた時点とした. [1]~[3] を満たす日は、45件中17件であった. このうち1997年7月26日は台風9709号の影響が大きいので、この日を除く16件を解析の対象にした.

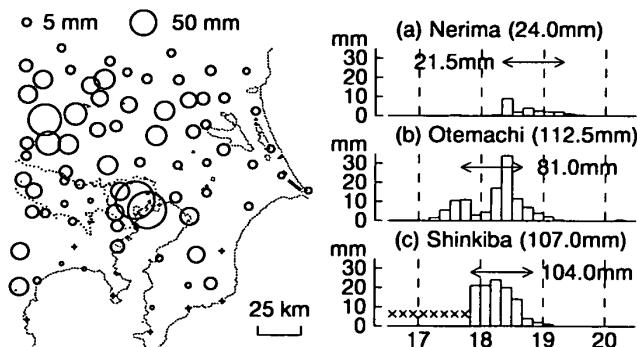
ついでながら、 $P_{\text{hour}} \geq 30\text{ mm}$ を条件にすると短時間強雨の全事例数は27件で、[1]~[3] を満たすのは台風時の1例を除いて12件である. $P_{\text{hour}} \geq 50\text{ mm}$ なら、全事例数は8件で、うち7件が[1]~[3] を満たす. このように、著しい短時間強雨ほど昇温日の午後に発生するものの比率が高くなる傾向がある.

第1表は対象日の諸データを示す. 強雨開始から終了までの時間は2件を除いて3時間以内である. 強雨開始時刻は午後の早い時刻から日没後までばらついていて、地上風系の特徴には時間帯による違いはないようだった.

第2図は対象日の地上天気図の例を示す. 1999年8月29日と24日は、三陸沖~日本海沿岸を前線が通り、1997年8月23日は関東に寒冷前線の南西端がかかっていた. 2000年7月4日は前線が描かれていないが、関東付近は弱いトラフになっていたことが伺える. このように、対象日の中に一様な高気圧下の日はなく、その意味で「総観規模擾乱による強雨」と「熱的局地循環が発達する状況下で起こった強雨」との間に厳密



第2図 対象日の地上天気図の例(09時). 気象庁「気象要覧」による.

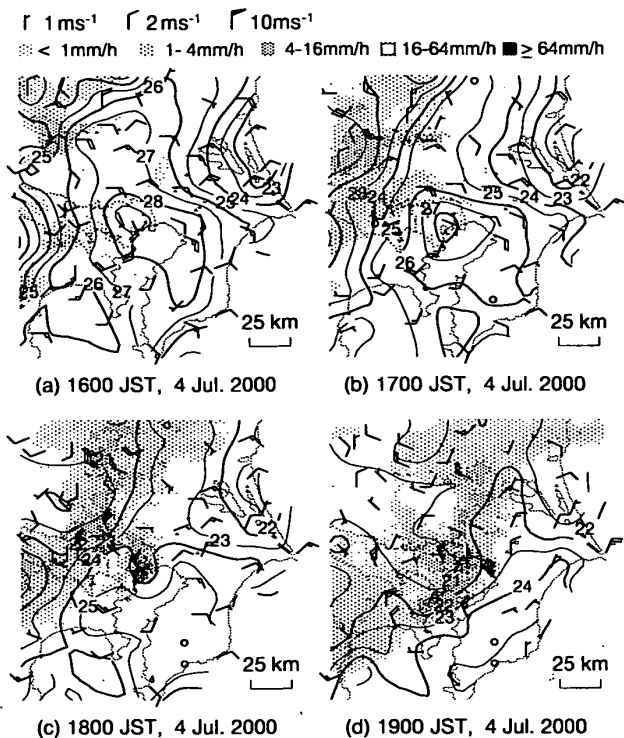


第3図 2000年7月4日12~24時の降水量分布(左側)と、練馬・大手町・新木場における10分降水量の時間変化(右側). 分布図は、○の面積が降水量に比例するように描かれている(+は無降水). 時間変化図については、地点名の後のカッコ内は12~24時の降水量を示し、←は最大1時間降水量を示す. ×は欠測.

な線引きはできない. しかし一方、上記の16件は前記の45事例の中から総観場や地上風系、降水系の振舞などに基いて主観的に「局地循環が発達した状況下の強雨」と見なされる事例とほぼ一致する. 従って、これらの16件は23区の強雨事例のうち、昇温して局地循環が発達した日の午後の事例をひと通り含んでいると考えられる.

3. 強雨発生日の風系と降水分布の特徴

高温日午後の東京の短時間強雨は、マクロに見れば



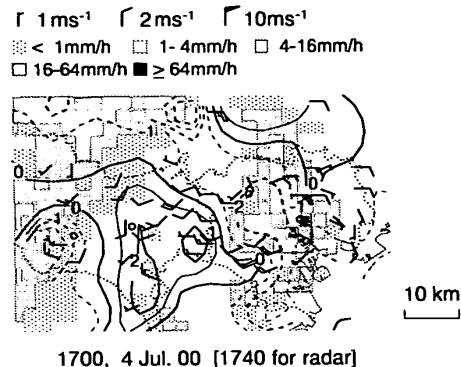
第4図 2000年7月4日のアメダスによる地上風・地上気温（等温線は1°Cごと）およびレーダーエコー。

内陸域で発生した100 km以上のスケールを持つ降水系の通過に伴って発生することが多いが、中には孤立した降水系に伴うものもある。まずそれぞれの例を1つずつ示し、その後に統計的な解析結果を示す。

3.1 2000年7月4日

第3図の左側に当日12～24時の降水量分布を、右側に23区内の3地点における10分間降水量の時間変化を示す。この日は正午過ぎに中部山岳で発生した長さ200～300 kmの降水系が南東進し、関東平野のほぼ全域で降水があった。中でも東京23区では夕方を中心として100 mmを超える降水があり、新木場では1時間降水量が104 mmに達した。なお新木場は17時50分まで欠測になっていたが、周辺地点の降水変化やレーダーエコーとの対比から見て降水の大部分を捉えていると判断し、第3図の分布図に含めた。

第4図はアメダスによる地上風と地上気温およびレーダーエコーの時間変化を示す。午前中は風が弱かったが、正午ごろには鹿島灘沿岸から東～東北東風が吹き、相模湾沿岸からは南風が吹き込む状態になった。午後になると内陸域で広範囲に降水系が発達し、南東へ移動するとともに、23区周辺でも散発的に弱い降水系が発生・消滅を繰り返した。この間、地上風系



第5図 2000年7月4日17時の東京都測定局における地上風と水平発散（等値線は 10^{-4}s^{-1} ごと；破線は負値＝収束）。陰影は17時40分のレーダーエコー。

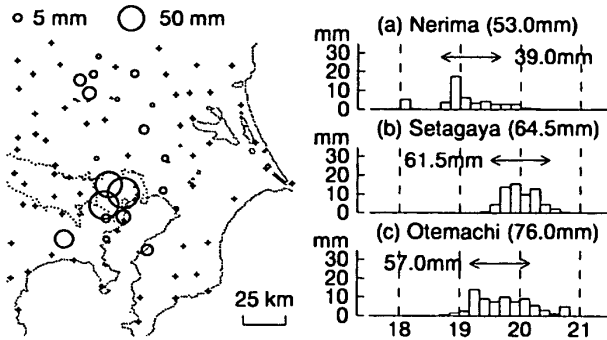
に大きな変化はなかったが、16時ごろからは相模湾沿岸周辺の風が南西寄りになり、これと東～東北東風との間の収束が23区付近で強まった（a）。東京に強雨をもたらした降水系は17時以降にこの収束域付近で発達したものであり、その位置は内陸から近づくマクロな降水系の前面に当たっていた（b）。その後、この降水系に23区上空の降水系が追いつかれて一体化し、都心に激しい雨をもたらした（c-d）。

強雨発生に先立つ都内の風の分布を細かく見るため、17時の東京都測定局（アメダスを含む）の風とそれに基づく水平発散を第5図に示す。後に強雨をもたらした降水系の発達場所を示すため、17時40分のエコー分布を重ねた。23区の東部では東風、中～西部では南西風が吹き、両者が23区で収束している。強雨をもたらした降水系の発達場所は、この収束域にほぼ一致する。なお16時にも、位置は17時のものから数kmずれるが、23区の東部が収束域になっていた。

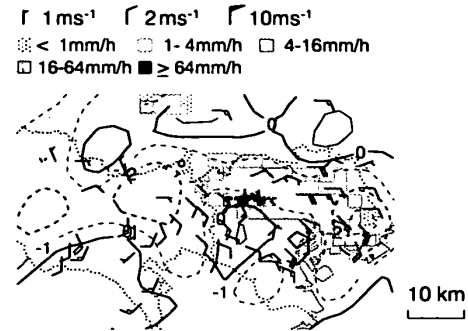
3.2 1999年8月29日

第6図に当日12～24時の降水量分布と23区内の3地点の時間変化を示す。この日は降水の範囲は限られていたが、23区内の一部地点では夕方に50 mmを超える強雨になった。これをもたらした降水系は、本州中部で散発的に発生したもののうちの1つであった。ただし、衛星写真によるとこれらの降水系を包含する長さ数百 kmの雲帯が南下していた（図は省略）。従って、各降水系はやはり数百 kmのスケールを持つ何らかのシステムに呼応して発生したことが推測される。

第7図はアメダスの風・気温とエコー分布を示す。午後になって鹿島灘からの東風と相模湾から吹く南風が発達し、両者が23区～多摩で収束する状態になった

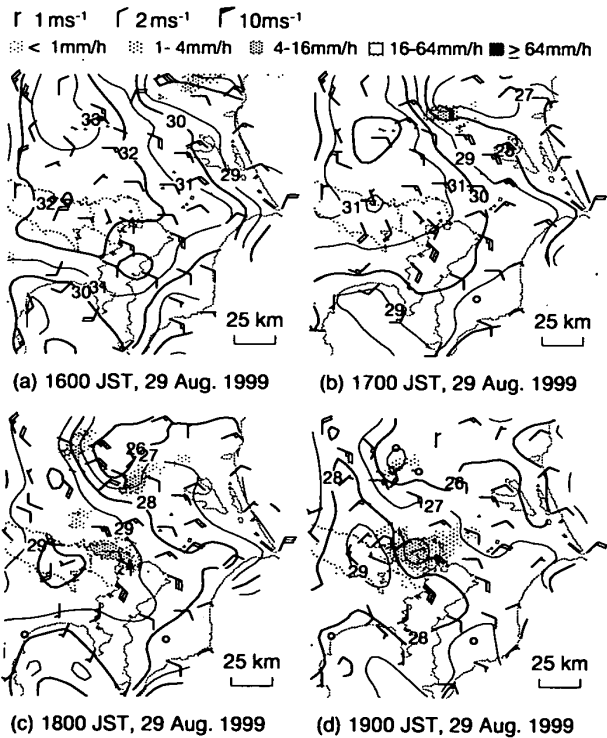


第6図 第3図と同様, ただし1999年8月29日.

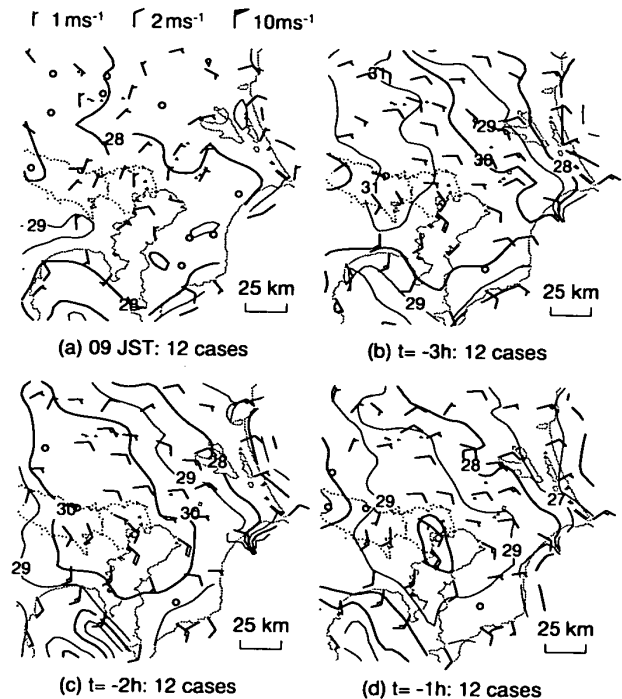


1700, 29 Aug. 99 [1800 for radar]

第8図 第5図と同様, ただし1999年8月29日17時の地上風と水平発散および18時のレーダーエコー.



第7図 第4図と同様, ただし1999年8月29日.



第9図 E-S型風系12件の風と気温のコンボジット. “ $t = -2h$ ”とは降水開始時刻の2時間前の意味.

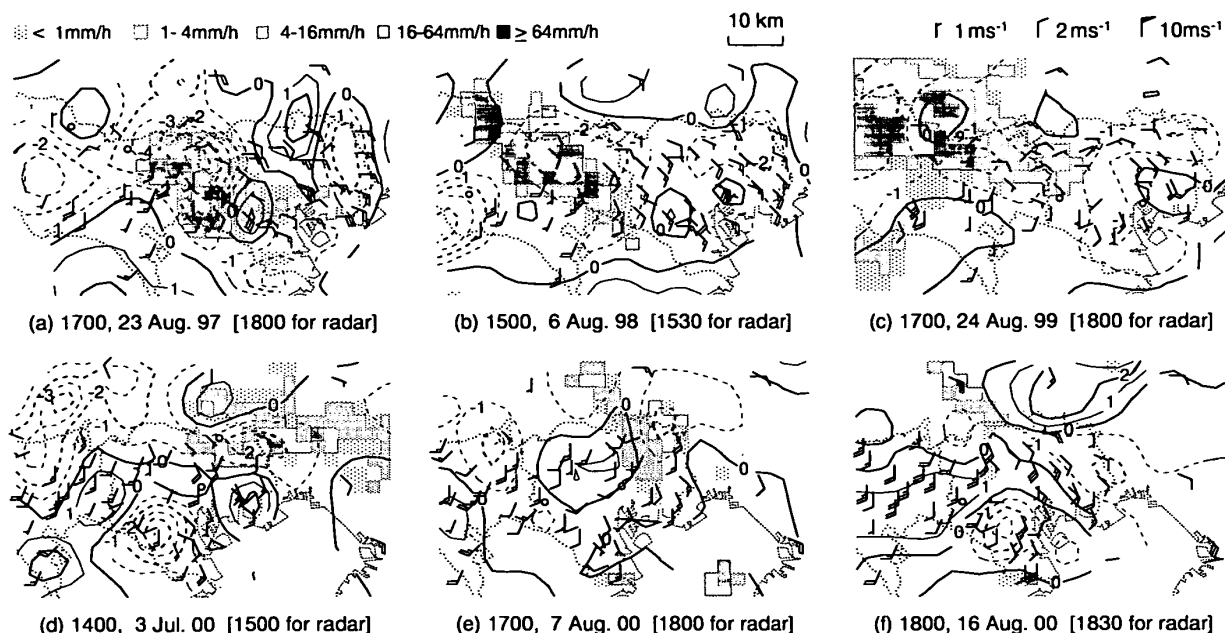
(a-b). 17時以降, この収束域に北西-南東走向の降水系が現れた (c). 降水系はゆっくり東進しながら発達し, それとともに北西-南東走向は不明瞭になって, 19時以降は北東-南西の走向を持つようになった (d). 20時ごろから降水系は弱まり, 22時にはほぼ消滅した.

第8図は17時の東京都測定局の風と発散, および18時のエコーを示す. 第5図と少し違って, 23区の北~東部では東風, 中~西部では南東~南風, 多摩では南西風という三様の風系が見られ, それぞれの境界が収束域になっていた (第5図の場合も, その1時間前には東風と南西風の間に南東風の領域が見られた). 後にエコーが発達した場所は東風と南東風の間の収束域で

あった. 図は省くが, ここは16時にもやや弱い収束域になっていた.

3.3 「E-S型」の定義と類例

以上に示したように, 23区の高温日午後の強雨発生に先立つ関東平野の風系は, 鹿島灘沿岸から吹く東寄りの風と相模湾沿岸から吹く南寄りの風とが23区から多摩にかけて収束するパターンになっていることが多い. 以後これを「E-S型」と言う. E-S型を数量的に定義するため, 23区の北東側の地点として我孫子・船橋・越谷を, 南西側の地点として横浜・府中・海老名



第10図 第5図と同様、ただし既出以外のE-S型の事例。

をとり(第1図)、それぞれの3地点のベクトル平均風を求めた。そして、強雨開始時刻の3時間前のベクトル平均風向が北東側グループで $30 \sim 120^\circ$ 、南西側グループで $130 \sim 220^\circ$ である場合をE-S型と定義した。その結果、16件中12件がこの条件を満たした。なお、これら12件を個別に見てみると、鹿島灘からの東風と相模湾沿岸からの南風は共通していて、主観的にもE-S型の特徴を持っている。

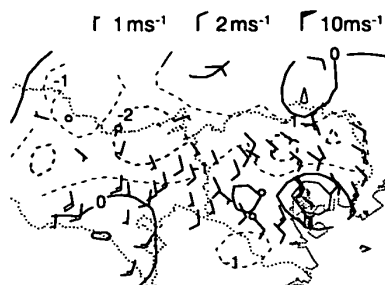
第9図は上記の12件について、09時および強雨開始時刻の3～1時間前のコンポジット(平均状態)を示す。09時は平野全体に風が弱い、東京付近から北では北～東寄り、相模湾沿岸では南寄りの風が吹き、すでにE-S型の分布が現れ始めている。その後、時間とともに鹿島灘からの東寄りの風と相模湾からの南寄りの風が発達し、強雨開始の3時間前にはE-S型が明瞭になっている。このように、E-S型の風系は強雨開始の数時間前から続いているのが普通である。

ついでながら、第2節で抽出した45事例のうち条件[1]～[3]から外れた28事例に関しては、上記のE-S型の定義に合うものは3件だけであり、このうち熱的局地循環が発達した日の午後に起こったのは1件(1994年7月7日;日最高気温が 28.2°C で条件[1]を満たさない)のみであった。従って、E-S型は23区の短時間強雨のうちでも高温日の午後に起こるものに特有の風系パターンであることが分かる。

気温分布を見ると、E-S型風系のもとでは東風域も

南風域も海岸から内陸へはいるほど昇温し、東京付近から北西に向かって高温の領域が延びている。ただし強雨の1時間前になると北西部では降水に伴って気温が下がり、23区付近が最も高温になる。個々の事例においても、気温分布パターンにばらつきはあるが、強雨発生前に東京付近が高温域になっている傾向がある(例えば第4, 7図)。第9図は日によって異なる時刻の気温分布を重ね合わせたものであり、気温の絶対値には大きな意味はないが、その分布パターンは個々の事例の特徴を代表することが分かる。

第10図は1997年以降の8件から既出の2件を除いた6件のE-S型事例について、強雨をもたらした降水系の発達に先立つ時刻(降水開始時刻のほぼ1時間前に当たる)の東京都測定局の風と発散、およびその30～60分後のエコー分布を示したものである。a～cの3件では、23区の北～東側から吹く東寄りの風と相模湾から吹く南～南西風、および東京湾から23区の南～西部を吹く南東風が、23区の西側から多摩にかけて収束域を成していた。各風系の範囲は事例によって少しずつ異なり、収束域の位置にも違いが見られるが、その後それぞれの収束域で降水系が発達している。このうちaとbの2件は孤立した降水系であり、cは接近しつつあるマクロな降水系から突き出すようにできたものである。d～fの3件は、南西風が23区の南西端付近まで達し、23区東部から千葉にかけて南東風が吹いて、全体に他の事例よりも各風系の範囲が東にずれていた。



第11図 1995年以降のE-S型事例10件を対象にした東京都測定局の風のコンポジットとその発散。

このうち事例eの収束域は埼玉県南部から東京湾に延び、そこにいくつかのセルを含む降水系が現れ、東京湾上のは竜巻を伴った。これら6件にほぼ共通して(dは例外)、降水系の走向が北西-南東方向であるのが注目される。なお図示された時刻の1時間前についても(図は省略)、第10図ほど明瞭ではないが、収束域とその後のエコー発生位置との間にある程度の対応が見られる。

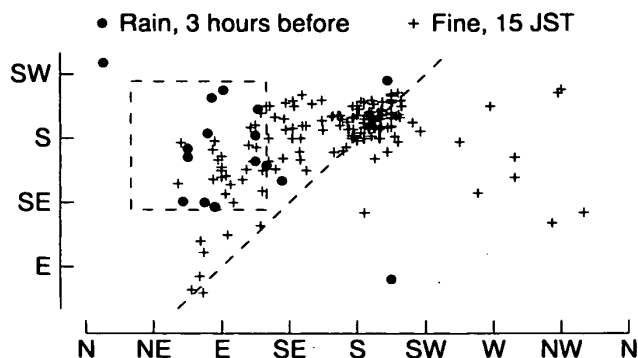
降水系発達前の都内の「平均状態」を見るため、1995年以降のE-S型事例10件についてのコンポジットを第11図に示す。対象時刻は、強雨をもたらしたエコーが顕在化した30～60分前(具体的には第5, 8, 10図の時刻と、1995年8月2日15時、22日13時)とした。図には東・南東・南～南西という3系統の風と、それらの間の収束域が表現されていて、これがE-S型の風系における都内の平均的な状態であることを伺わせる。

最後に、E-S型の判定基準から外れた4事例に触れておく。1999年7月21日は鹿島灘沿岸からの東風が弱く(E-S型の基準に漏れたのはそのため)、東京湾から南の地域では強い南～南西風(5 m/s前後)が吹いていた。しかしE-S型の場合と同様、23区～多摩は収束域になって、その中の練馬付近に降水系が発生・発達した。翌22日にも、前日とほぼ同様の風系下で、ほぼ同じ場所に降水系が発生した。1997年9月3日と2000年7月2日は、ほぼ様な風系(それぞれ南東風と北東風)のもとで、内陸から進んできた降水系が通過していった。東京付近に目立った収束域はなく、都内で降水系が発達する傾向は見られなかった。

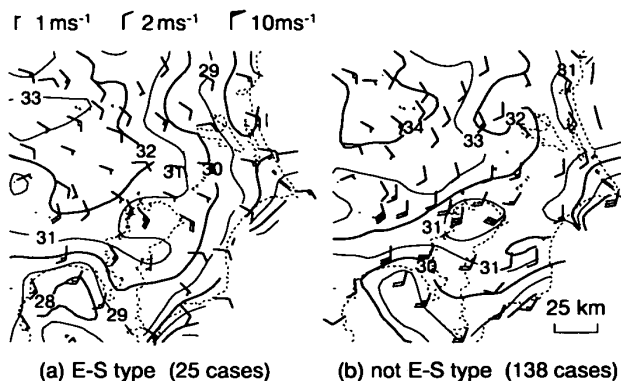
4. E-S型風系の気候学的位置づけ

4.1 海風の1形態としてのE-S型の特徴

この節ではまず、前節で東京の強雨発生前の特徴と



第12図 23区の北東側(我孫子・船橋・越谷; 横軸)と南西側(横浜・府中・海老名; 縦軸)それぞれのベクトル平均風の風向のプロット。強雨事例については強雨開始時刻の3時間前、晴天日については15時。

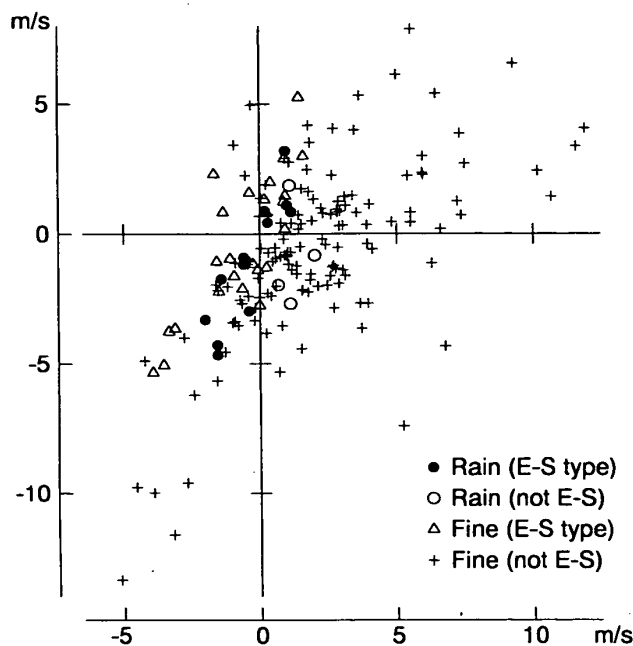


第13図 晴天日(a:E-S型, b:それ以外の日)15時の風と気温のコンポジット。

して指摘したE-S型の風系を、晴天日の午後の風系(海風)と比べてみる。晴天日は1979～2000年の7, 8月を対象にして、[1] 東京(大手町)・横浜・千葉・熊谷・水戸・前橋の1日の日照時間がすべて8時間以上であり、[2] 関東平野の海拔100 m以下の場所にあるアメダス地点(63地点)のうち12～21時に1 mm以上の降水のあった地点が5地点以下であることを条件として抽出した。なお、これら「晴天日」と対比して、前節までに論じてきた16件を以下「強雨日」と言う。

第12図は、3.3節で定義した2グループのベクトル平均風の風向をプロットしたものである。破線の範囲内が3.3節で定義したE-S型である。晴天日は両グループともに南～南西風である場合が多いが、E-S型の場合もあり、また少数ながら両グループとも北東～東風という日もある。

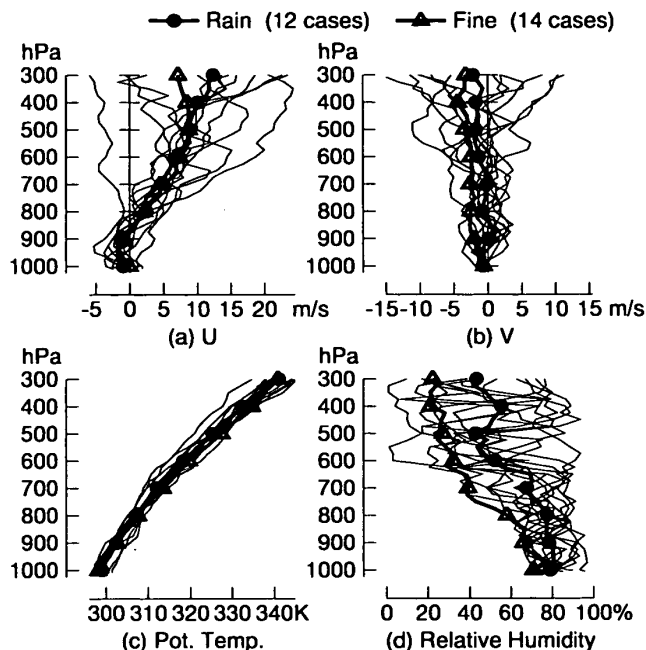
第13図は晴天日をE-S型の基準に合う25日とそれ以外の138日に分け、15時の風と気温のコンポジットを



第14図 09時の本州中部の気圧傾度を地衡風 (u 成分=横軸, v 成分=縦軸) に換算してプロットしたもの。

示したものである。E-S型においては鹿島灘からの東寄りの風と相模湾沿岸の南風が発達していて、強雨日のE-S型風系(第9図)に似ている。これら以外の日の平均状態は、平野全体が南寄りの風になっている。藤部(1993)の風系分類と比べると、E-S型は「北東風日」と「南東風日」の中間ぐらに対応し、その他の日の平均は「南風日」の状態に近い。このように、E-S型は晴天日に現れるいくつかの風系パタンのうちの1つであって、比較的東風が優勢な場合に相当する。

第14図は場の気圧傾度を地衡風に換算してプロットしたものである。場の気圧傾度は、小名浜・銚子・石廊崎・高田・新潟の09時の海面気圧に最小2乗法で平面を当てはめて計算した。晴天日のE-S型風系は、地衡風が0ないし東寄り(u 成分 <0)のときに現れることが分かる。強雨日の地衡風もほぼ同じ範囲にあるが、晴天日のE-S型に比べてわずかに右(u 成分の正の側)にずれて分布している。この理由の1つとしては、強雨日の総観場の時間変化が考えられる。強雨日の典型的な状況として寒冷前線帯が南下してくることがあり(第2図参照)、そういう場合には場の風は時間とともに東寄りの成分を強めてくるため、09時の地衡風は午後の東成分を弱めに表現するであろうからである。実際、21時の地衡風を計算してみると、晴天でE-S型



第15図 E-S型風系日における09時の館野の高層状態。強雨日については個々の日のデータ(細線)と平均値(●)を、晴天日については平均値のみ(△)を示す。

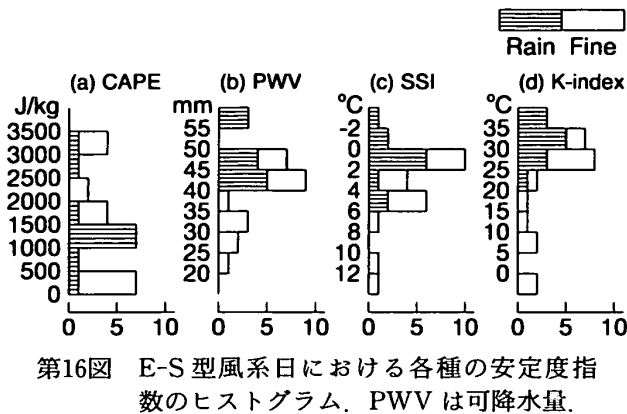
の日と強雨日との地衡風の差は小さくなる。

4.2 強雨日と晴天日の大気状態の違い

同じくE-S型でありながら、日によって晴天と強雨という違いができる理由は、総観的な大気状態の違いにあると推測されよう。この点を簡単に検証するため、1988年以降の高層観測資料を使って強雨日と晴天日の高層状態を比べた。

第15図は09時の館野の風(u は東西, v は南北成分)、温位、相対湿度について、E-S型の強雨日と晴天日の鉛直プロファイルを示したものである。各カテゴリーの平均状態を見ると、強雨日も晴天日も下層の東風の厚さは900 hPaぐらいまでであり、大きな違いはない。温位は強雨日のほうがやや低いが、晴天日との差は小さい(500 hPaで1.8 Kの差)。両者の違いが最も目立つのは相対湿度であり、強雨日は晴天日に比べて対流圏下～中層が湿っている。このため下～中層の相当温位は強雨日のほうが高く(図は省略)、対流不安定度 $d\theta_e/dp$ は晴天日よりむしろ小さい。ただし各要素とも事例ごとによりかなりのばらつきがある。

館野より北にある輪島や仙台(図は省略)についても状況は似ているが、強雨日と晴天日の相対湿度差は館野の場合よりも小さく、温位差はやや大きい(両地点とも500 hPaで2.2 K)。また、強雨日は100 hPa当たり2 m/sぐらゐの鉛直シア(上空ほど西風増加)があ



り、前線帯の存在が伺える。このように、強雨日の関東平野は典型的には上空に寒気を伴う前線帯の南側の湿潤域に当たっている。ただし第2図から分かるように、前線帯の南側と言っても地上で強い南西風が吹く状況ではなく、関東付近は広い一様な低圧部になっている点が特徴である。

なお図は省略するが、E-S型以外の日(86例)についても各要素の鉛直分布の特徴は第15図に示されたE-S型晴天日のものと似ている。言い替えると、対流圏下～中層の低湿度はE-S型の日だけでなく晴天日全体の特徴である。

第16図は09時の館野の観測結果から求めたいくつかの安定度指数(水野, 2000)のヒストグラムである。SSIは値が小さいほど、他の3つは大きいほど不安定傾向である。図によると、CAPEを除いて強雨日のほうが晴天日に比べ、不安定傾向を示す日が多い。2組のデータ x_i ($i=1\sim m$) と y_j ($j=1\sim n$) の頻度分布の「分離度」 B を

$$B = \frac{x_i > y_j \text{ である組み合わせ数}}{mn} \times 2 - 1$$

で定義すると、 x と y の度数分布が同じならば $B=0$ 、完全に分離していれば $B=\pm 1$ である。これを強雨日の値を x 、晴天E-S型の値を y として計算すると、 B の絶対値の大きい順にK-index($B=0.77$)、可降水量(0.73)、SSI(-0.71)となり、CAPEは最も低い(0.10)。K-indexや可降水量の成績がいいのは、これら対流圏下～中層の湿りを反映するからであろう。一方、CAPEに強雨日と晴天日の差が現れないのは、第15図から分かるように地上では晴天日でも70～80%の相対湿度があり、強雨日と大差ない(そして温位の鉛直分布にもほとんど差がない)ことによるものであろう。

5. 議論

東京の短時間強雨の発生に先立って東寄りの風と南寄りの風とが収束する傾向のあることは、予報現場では経験的に知られていたようだし、第1節で触れたようにいくつかの事例解析でも記述されてきた。今回の解析の意義はこの点を統計的に確かめたことにある。また、従来の解析がともすれば東京付近の狭い範囲に注目しがちであったのに対し、今回は東風や南風がそれぞれ鹿島灘と相模湾から吹き込む広域的な風系であり、それらから成る「E-S型風系」は関東平野に現れる多様な「海風」パタンのうちの1つであることを明示した。これらの知見により、東京の短時間強雨に先立つ「E-S型風系」の存在とその特徴を、関東平野スケールの視点から確認することができた。

より小さいスケールにおいては、強雨発生に先立って23区周辺に10～20 kmスケールの収束域が存在することが見出された。この点も2, 3の事例解析で指摘されてきたが(例えばYonetani, 1989)、今回はこれをより多くの事例に基づいて再確認した。また、23区のスケールで見ると鹿島灘から吹く東風と相模湾からの南風に加え、東京湾から吹く南東風が認められることが多い(第8, 10, 11図)。その場合には、これら3つの風系の境界が収束域になる傾向があるが、各風系の範囲は事例ごとに異なり、これに応じて収束域の場所も異なる。それにもかかわらず、降水エコーの発生位置は各事例の収束域とよく対応しており、降水系の発達に10～20 kmスケールの収束と密接に関連することが伺える。もっとも、このことの解釈においては、①: 収束による上昇流や水蒸気の集中が対流雲を発生・発達させるということ以外に、②: 発生期の対流雲に伴う上昇流が地上の収束を強めているという、①とは逆の因果関係を考慮すべきかも知れない。とりわけ、強いエコーが現れる直前(第5図や第10図)の顕著な収束には②が働いている可能性がある。しかし、エコーが発達した場所はその1時間以上前から収束域になっている傾向があること、またエコーの走向が関東平野の多くの降水系(北東-南西方向)と違い、収束域に沿うように北西-南東方向へ延びる場合がよくあることは、②だけでは説明しにくく、①の重要性を示唆する。

このほか、今回の結果の中で注目されるのは、23区に短時間強雨をもたらす降水系が、数十 km以上のスケールを持つマクロな降水系の接近に呼応して発生・発達する傾向がある点である(3.1節の事例)。このことの解釈については今後の検討に委ねたい。従来、こ

のようなケースについては、接近しつつある降水系から吹き出す風が下層の収束を強め、新たな降水系の発達を促すと考えられたこともあるが、今回の対象事例の中でそうした吹き出し風が確認できるものは必ずしも多くない。3.2節で示したように、長さ数百 km の雲帯の中に孤立した降水系が発生する場合もあり、これに関しては境界層内だけでなくもっと上空での励起因子（例えば上空のトラフ）の影響を考えざるを得ないように思える。

最後に、東京の短時間強雨に対する都市の影響について論じておきたい。都市ヒートアイランドの存在はよく知られており、それが地上風の収束を伴うことは、統計解析や数値モデルによって確認されている（Fujibe, 1988；吉門, 1990など）。また夏の午後には首都圏の都市化によって東京から数十 km 以上内陸に至る広い範囲が昇温し、太平洋から中部山岳に向かって吹く南寄りの風（広域海風）は東京の北～西側で収束する傾向を持つことが指摘されている（Kimura and Takahashi, 1991；気象庁, 1994；Fujibe, 1994；Kusaka *et al.*, 2000；近藤, 2001）。これらの知見に照らして考えると、E-S 型の風系における東京付近の高温域や収束域は都市効果の影響を受けてできたように思えるかも知れない。しかし一方、夏の午後の気温分布に対しては海風の影響が大きいことが知られており（例えば藤部, 1993）、東京付近の高温域は 2 方向（鹿島灘と相模湾）からの海風による冷氣移流の中に取り残された領域であるとの見方もできる。E-S 型の風系の形成にとって、ひいては東京23区の強雨の発生にとって、都市効果がどのように寄与しているかについての検討は今後の課題としたい。

6. まとめ

- (1) 東京23区における夏季晴天日の短時間強雨、すなわち日最高気温が30℃以上になり午後に20 mm/時以上の降水が観測された例は、1994～2000年の7年間に16件あった（台風時の1例を除く）。そのうち12件では強雨発生に先立って鹿島灘沿岸から吹く東寄りの風と相模湾沿岸から吹く南寄りの風とが東京付近で収束するパターン（E-S 型）になっていた。
- (2) 上記のパターンにおいて、東京付近を詳しく見ると、10～20 km スケールの収束域が1つないし複数個あった。その後降水系が発生・発達した場所は、これらの収束域のどれかに対応していた。

- (3) E-S 型の風系は晴天日でも東風が吹きやすい気圧配置のもとでは現れることがあり、その意味では関東平野に現れる多様な「海風」パタンのうちの1つである。しかし、強雨日は関東付近が前線帯になりやすく、晴天日に比べ対流圏下～中層が湿っていて、K-index や可降水量が大きい傾向が認められた。

謝 辞

CAPE, 可降水量および SSI の計算プログラムは気象研究所予報研究部の瀬古 弘氏からお借りした。レーダーデータは東京管区气象台技術課に提供して頂いた。気象官署と東京都大気汚染常時監視測定局の資料は気象研究所所蔵の CD-ROM を利用した。

参 考 文 献

- Fujibe, F., 1988: Weekday-weekend differences of urban climates Part 3: Temperature and wind fields around Tokyo and Osaka, *J. Meteor. Soc. Japan*, **66**, 377-385.
- 藤部文昭, 1993: 関東平野における春・夏季晴天日の気温分布の日変化, *天気*, **40**, 759-767.
- 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, 1998: 東京における降水の空間偏差と経年変化の実態, *天気*, **45**, 7-18.
- 藤部文昭, 2001: 都市が降水に及ぼす影響, *水利科学*, **45**(1), 1-14.
- 神田 学, 石田知礼, 鹿島正彦, 大石 哲, 2000: 首都圏における局地的対流性豪雨と GPS 可降水量の時空間変動—1997年8月23日の集中豪雨の事例解析—, *天気*, **47**, 7-15.
- Kimura, F. and S. Takahashi, 1991: The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo Metropolitan area: A numerical experiment, *Atmos. Environ.*, **25B**, 155-164.
- 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.
- 近藤裕昭, 2001: 人間空間の気象学, 朝倉書店, 113-124.
- Kusaka, H., F. Kimura, H. Hirakuchi and M. Mizutori, 2000: The effects of land-use alteration on the sea breeze and daytime heat island in the Tokyo metropolitan area, *J. Meteor. Soc. Japan*, **78**, 405-420.

- 水野 量, 2000 : 雲と雨の気象学, 朝倉書店, 125-131.
 佐藤尚毅, 高橋正明, 2000 : 首都圏における夏期の降水特性の経年変化, 天気, 47, 643-648.
 Yonetani, T., 1982 : Increase in number of days with heavy precipitation in Tokyo urban area, J. Appl. Meteor., 21, 1466-1471.
 Yonetani, T., 1983 : Enhancement and initiation of a cumulus by a heat island, J. Meteor. Soc. Japan, 61,

244-253.

- 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.

Surface Wind Patterns Preceding Short-time Heavy Rainfall in Tokyo in the Afternoon of Midsummer Days

Fumiaki FUJIBE^{*1}, Kohei SAKAGAMI^{*2},
Koetsu CHUBACHI^{*2} and Koji YAMASHITA^{*3}

^{*1} (*Corresponding author*) *Meteorological Research Institute, Tsukuba 305-0052, Japan.*
E-mail : ffujibe@mri-jma.go.jp

^{*2} *Tokyo District Meteorological Observatory (Present affiliation : Forecast Department, Japan Meteorological Agency).*

^{*3} *Forecast Department, Japan Meteorological Agency.*

(Received 12 November 2001 ; Accepted 27 February 2002)

Abstract

Analysis was made on local wind fields preceding the occurrence of short-time heavy rainfall in Tokyo, with attention to their relationship to the behavior of radar echoes. Data for seven years were used to select 16 cases in which temperature reached 30°C and precipitation of 20 mm/h or more was observed in the afternoon in the Tokyo ward area. It was found that 12 among the 16 cases were characterized by the “E-S type” pattern, in which easterly winds blowing from the east coast of the Kanto plain and southerly winds from the southwestern coast were converging in the vicinity of Tokyo. A detailed analysis for the Tokyo area revealed the presence of one or a few convergence zones having a scale of 10-20 km, corresponding to the subsequent development of radar echoes. The E-S type wind pattern can be formed on sunny days also, if the synoptic-scale pressure gradient is favorable for the onset of easterly sea breeze, but days with heavy rainfall tended to be characterized by higher humidity in the lower and middle troposphere, with larger values of the K-index and precipitable water vapor than sunny days without rainfall.