

東京都市部に短時間強雨をもたらした降水系の 降雨強化に結びつく局地風の特徴

中 西 幹 郎*・原 由 紀 男*

要 旨

夏の午後に短時間強雨をもたらす熱雷・界雷性の降水系の降雨が、東京都市部（23区を想定）で強くなることがあることに注目し、23区でその周辺よりも降雨が強まった日（強化日）とそうでなかった日（非強化日）を比較して、23区での降水系の降雨強化に結びつく局地風の特徴を調べた。

強化日、非強化日ともに、23区で降雨が始まる2時間前、鹿島灘からの東寄りの風と相模湾からの南寄りの風の少なくとも一方が吹いていた。このような海風系の局地風により、強化日には23区に強い収束が継続し、降雨開始時刻になると急速に増強した。このとき、強化日6件中4件で、降水系に伴う局地風すなわち冷氣プールからの発散風が確認できた。非強化日には強い収束があっても継続せず、発散風があっても収束の増強は確認できなかった。降雨開始前の海風系の局地風による強い収束の継続と降雨開始頃の主に発散風による収束の増強が、23区での降水系の降雨強化に結びつくことが示された。

1. はじめに

近年関心を集めている夏の午後の東京23区における短時間強雨は、鹿島灘からの東寄りの風と相模湾からの南寄りの風が東京付近で収束するときに起こることが多い（例えば、藤部ほか、2002；以下、F02）。この短時間強雨をもたらす降水系を観察してみると、東京付近に移動してきた降水系が、そこで降雨を強める場合もあれば、ほとんど強めない場合もある。F02など過去の同様の研究の多くは、東京付近での降水系の降雨強化・非強化には言及していない。

東京付近での降水系の降雨強化を可能にするであろう原因の1つは、ヒートアイランドである。しかし、ヒートアイランドは、降雨を強めない場合の説明を難しくする。藤部（1998）や佐藤・高橋（2000）は、ヒートアイランドによる東京の豪雨の可能性を指摘する反面、それ以外の現象による可能性も示唆している。

最盛期の積乱雲の下には、氷の粒の融解や雨粒の蒸発でできた冷氣のプールが形成される。冷氣プールは

高圧部となるため、そこから発散する風が現れる。発散風は環境風とぶつかって上昇流を引き起こし、そこに新たな積乱雲を発生させることがある。この結果、激しい降雨をもたらしたと見られる事例が過去にあった（例えば、小倉、1997）。東京付近には、環境風として冒頭の海風系の局地風がある。これに冷氣プールからの発散風がぶつかることが、東京付近での降水系の降雨強化の一因になることも考えられる。

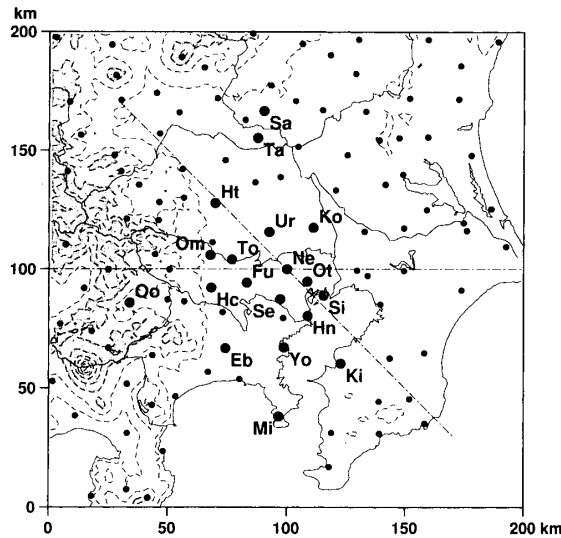
この研究の目的は、ヒートアイランドの影響はさておき、東京都市部に短時間強雨をもたらした降水系の降雨強化に結びつく、発散風を含む局地風の特徴を調べることである。解析手順は概ねF02にならったが、選択された短時間強雨日を東京都市部で降雨が強まった日とそうでなかった日に分けて解析した。

短時間強雨のように局所的で寿命の短い現象では、なるべく空間・時間スケールの細かい観測値を利用することが望ましい。ここでは、時間スケールを重視し、気象庁のアメダス10分値を利用することにした。なお、F02にならって混乱を避けるため、アメダス観測点の「東京」は「大手町」と表す。また、「東京都市部」は、23区をほぼ覆う大手町から半径15 kmの範囲とし、以下「23区」と表す。

* 防衛大学校応用科学群地球海洋学科。

—2002年4月16日—

—2002年12月5日—



第1図 解析領域の地形とアメダス観測点の位置 (黒丸)。実線は海岸線および行政界である。破線は200 mを最初に400 mごとの等高線で、200 m以上に薄い陰影、1000 m以上に濃い陰影を付けた。一点鎖線は、第4および7図の北西-南東線および西-東線を示す。大きい黒丸は本文や表に登場する観測点で、Ot: 大手町、Ne: 練馬、Si: 新木場、Se: 世田谷、Hn: 羽田、Fu: 府中、Hc: 八王子、Om: 青梅、Yo: 横浜、Eb: 海老名、Mi: 三浦、Ur: 浦和、Ko: 越谷、To: 所沢、Ht: 鳩山、Ki: 木更津、Sa: 佐野、Ta: 館林、Oo: 大月である。

2. 解析の概要

2.1 使用データ

1997~2000年の4年間の7、8月を対象に、アメダス10分値、毎正時のレーダー・アメダス解析雨量 (以下、解析雨量) および一部で館野の高層観測値を使用した。解析領域は、アメダス観測点の練馬を中心とする東西、南北ともに200 kmの範囲とした。解析領域の地形とアメダス観測点の位置を第1図に示す。

この論文では主に水平発散を議論する。この気象要素は、ほかの要素に比べて観測点の有無に大きく影響される。そこで、欠測の多い新木場のデータは、風向・風速に限ってすべて欠測扱いすることにした。23区の東京湾沿岸の4要素観測点は新木場だけであるが、幸い、アメダス10分値には羽田のデータが記録されている。したがって、新木場のデータを欠測扱いしても、23区の水平発散は問題なく算出できると判断した。

2.2 短時間強雨日の選択

23区において、夏の午後に熱雷・界雷性の短時間強雨が起った日を抽出するため、5つの条件

- ① 降水量を観測している大手町、練馬、新木場、世田谷、羽田のどこかで、10分値を積算して10分ごとに求めた1時間降水量が10 mm以上
- ② 上記を満たす観測点の降雨開始時刻が12~21時
- ③ 上記を満たす観測点の降雨終了時刻が24時以前
- ④ 気温を観測している大手町、練馬、新木場のどこかで、10分値の気温の日最高値が30°C以上
- ⑤ 降水系が海上から移動してきた日は除く

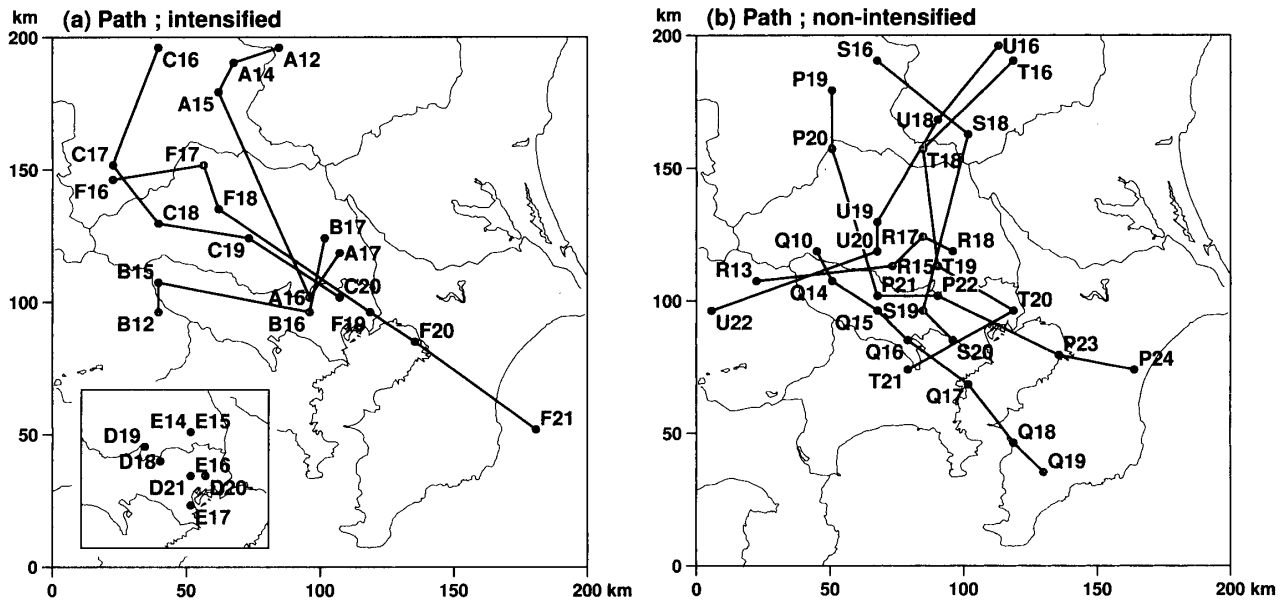
を設定した。ここで、降雨開始時刻は、日最大10分間降水量を観測したひと続きの (10分間降水量が途絶えることなく観測される) 降雨期間において、最初に降水量を観測した時刻の10分前とした。降雨終了時刻は、同期間の最後に降水量を観測した時刻とした。これらの条件はF02と概ね同じであるが、①の条件は緩和し (F02は20 mm以上)、降雨期間と開始・終了時刻の定義は簡素化した (F02は例えば開始時刻を、10分間降水量が初めて3 mmを超えた時点の10分前とした)。

①~④の条件を満たす14件のうち、⑤に該当する1997年7月26日と1998年7月26日の2件を除く12件を短時間強雨日として選択した。F02と比較すると、同じ解析期間で1998年7月30日の事例が増えたのみである。地上天気図は割愛するが、12件すべてにおいて、吉崎 (1996) が示した関東地方での雷雨の発生条件の1つ (前線など大きなスケールの擾乱が関東地方を通過するまたはその近くにある) を満たしていたか、あるいは上空に寒気が流入していた。

2.3 短時間強雨日の分類

選択された短時間強雨日のうち、23区内の観測点の最大10分間降水量が、23区外で大手町から80 km以内の観測点のそれよりも多かった日を強化日、そうでなかった日を非強化日とした。ここで、大手町から80 kmはほぼ東京都の最西端までの距離に相当する。

短時間強雨日の分類を第1表に示す。館野の高層観測値に基づくショワルターの安定度指数 (SSI) は、関東平野程度のスケールの大気安定度をかなりよく代表することが、F02や田口ほか (2002) により示されている。このSSIは概して強化日の方が小さかった。特に事例Eの21時のSSIは降雹の目安となる-3°Cで、実際大手町で雹を観測した。23区内の最大10分間降水量を23区外のそれと比較すると、強化日は、事例Fを除いて高々5 mm多い程度であったが、非強化日は、事例Tを除いて10 mm程度以上少なかった。強化日における10分間で5 mmの差も小さいとは言えないが、非強化日には23区外で、その差以上に激しく降ったときが



第2図 23区に短時間強雨をもたらした降水系の中心（解析雨量が最大）の位置の移動。(a) 強化日および (b) 非強化日。解析領域に入る位置だけを示す。図中のアルファベットは第1表の事例、それに続く2桁の数字は時刻を表す。

多くあったことがわかる。

複数ある降水系のなかで23区に短時間強雨をもたらした降水系について、解析雨量が最大であった位置の移動を第2図に示す。強化日、非強化日ともに南東進した降水系が多い。ただし、強化日には23区付近に突然現れてその付近を迷走したもの(事例DやE)、非強化日には南西進したもの(事例U)もある。

2.4 23区の降雨開始時刻

降雨開始時刻は第2.2節の定義に基づき、観測点ごとに決められる。水平分布の解析では、23区を代表する降雨開始時刻を決めたい。基本的にそれは、23区内の

最大10分間降水量を記録した観測点の降雨開始時刻とした。このときの開始時刻は、第1表に示す時刻の20～40分前となるのが普通であった。ところが、事例Fだけは80分前となった。事例Fの大手町での降水量の時間変化を見ると、2つの明瞭なピークがあり、2つの降水系の影響があった可能性がある。18時30分のピークをもたらした降水系による開始時刻が判別できないので、事例Fのみ例外的に、練馬や世田谷の開始時刻である18時10分を23区の降雨開始時刻とした。

2.5 冷氣プールからの発散風

冷氣プール近傍の観測点の風向が概ねプールの中心方向を向き、2時間前の風向に比べて4方位/16方位以上変化したとき、発散風があったとみなした。

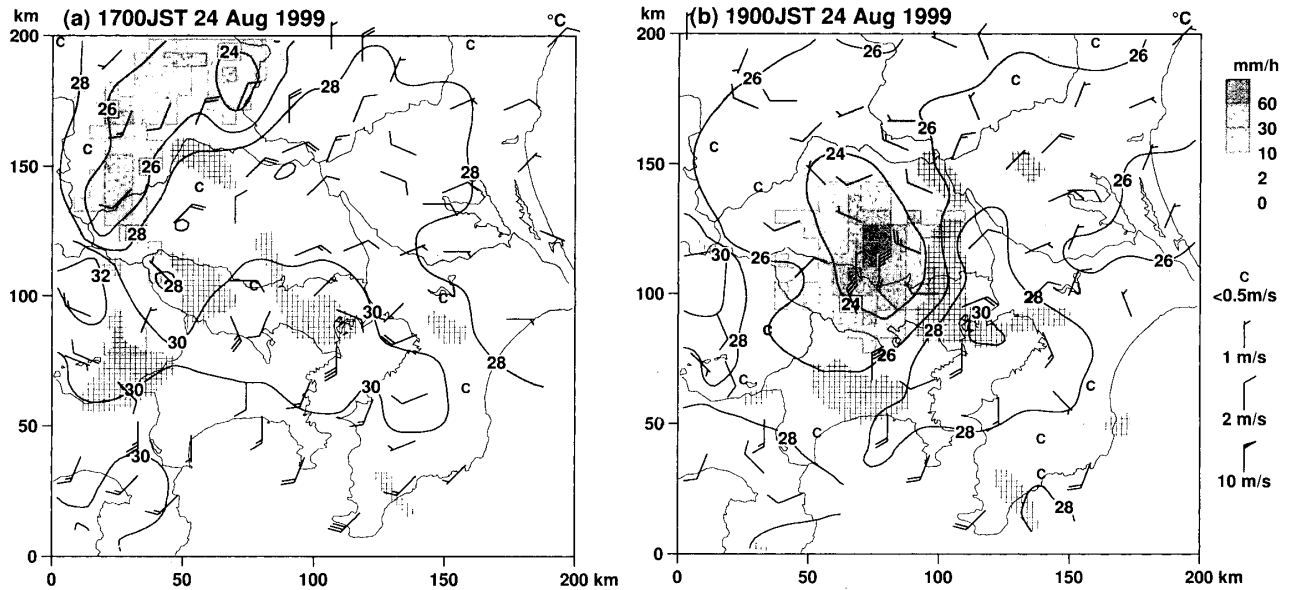
2.6 水平分布の解析方法

気象要素の水平分布を描く場合や水平発散を求める場合には、逐次修正法(清水, 1978)に基づいて、観測値を格子上に内挿した解析値を使用した。アメダス観測点の設置間隔より細かい格子への内挿は大きな意味を持たないが、分布を滑らかに描くために格子間隔は2 kmとした。

第1表 短時間強雨日の分類、安定度指数 (SSI) および降雨状況。

分類	事例	年月日	館野のSSI (°C)		最大10分間降水量 (mm)・観測点・起時					
			09h	21h	23区内			23区外*)		
強化日	A	1999.7.21	-0.8	-0.6	26.5	練馬	15:30	24.5	越谷	16:00
	B	1999.7.22	-0.7	0.0	20.5	練馬	15:20	15.5	大月	13:20
	C	1999.8.24	0.9	-2.5	23.0	大手町	19:50	18.0	青梅	18:10
	D	1999.8.29	0.4	0.3	17.5	練馬	19:00	12.5	海老名	22:00
	E	2000.7.3	0.5	-3.0	8.5	世田谷	16:50	8.0	木更津	15:20
	F	2000.7.4	-2.3	1.3	34.0	大手町	18:30	17.5	大月	13:50
非強化日	P	1997.8.23	3.6	-0.5	13.0	新木場	22:20	25.0	横浜	22:50
	Q	1998.7.30	2.0	-0.2	5.5	世田谷	17:10	33.5	横浜	16:20
	R	1998.8.6	1.1	-0.5	16.5	世田谷	15:50	25.0	浦和	16:50
	S	2000.7.2	0.1	0.6	10.0	世田谷	19:20	22.5	佐野	17:10
	T	2000.8.7	3.8	-1.5	18.5	大手町	18:50	21.0	館林	17:20
	U	2000.8.16	4.2	0.4	8.5	練馬	19:30	24.5	鳩山	18:40

*)ただし、大手町から80 km 以内。



第3図 事例Cにおける23区の(a)降雨開始2時間前および(b)降雨開始時刻の地上風(矢羽), その収束域(網掛け), 海面補正した気温(太い実線)および解析雨量(陰影)の水平分布. 収束域は発散量が $-2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 以下だけを示し, 図中の数字は等値線上の気温($^{\circ}\text{C}$)を表す.

逐次修正の基本となる重み関数 W は,

$$W(R) = \max\left(\frac{1}{1+9(R/R_I)^2} - 0.1, 0.0\right) \quad (1)$$

とする. ここで, R は格子点から観測点までの距離, R_I は影響半径 (ここでは30 km とする) である. 分母の係数9 は, 影響半径以遠にある観測点の寄与が10% 以下になるように選んだ. 0.1を引いてあるのは, その寄与を完全に消すためだけの理由である. 補足しておくと, 逐次修正のおかげで, 分母の係数を多少変更しても結果を左右するような差は現れない. しかし, 小さくするにつれて平滑度の増大により解析誤差が十分小さくなるまでの修正回数が増し, 大きくするにつれて目玉状の分布が目立ってくる.

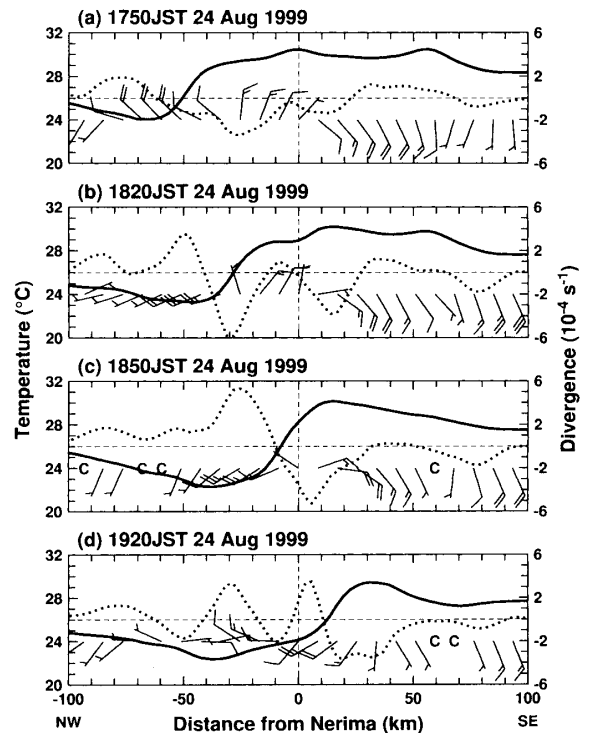
アメダス観測点は比較的等間隔に分布しているのですがそれほど問題ではないが, 観測点がある地域に集中する場合, 解析値はその地域の観測値に引きずられてしまう. このような不都合を避けるため, 各観測点に対し, 観測点密度に反比例する関数

$$W_{Di} = 1 / \sum_{j=1}^n W(R_{ij}) \quad (2)$$

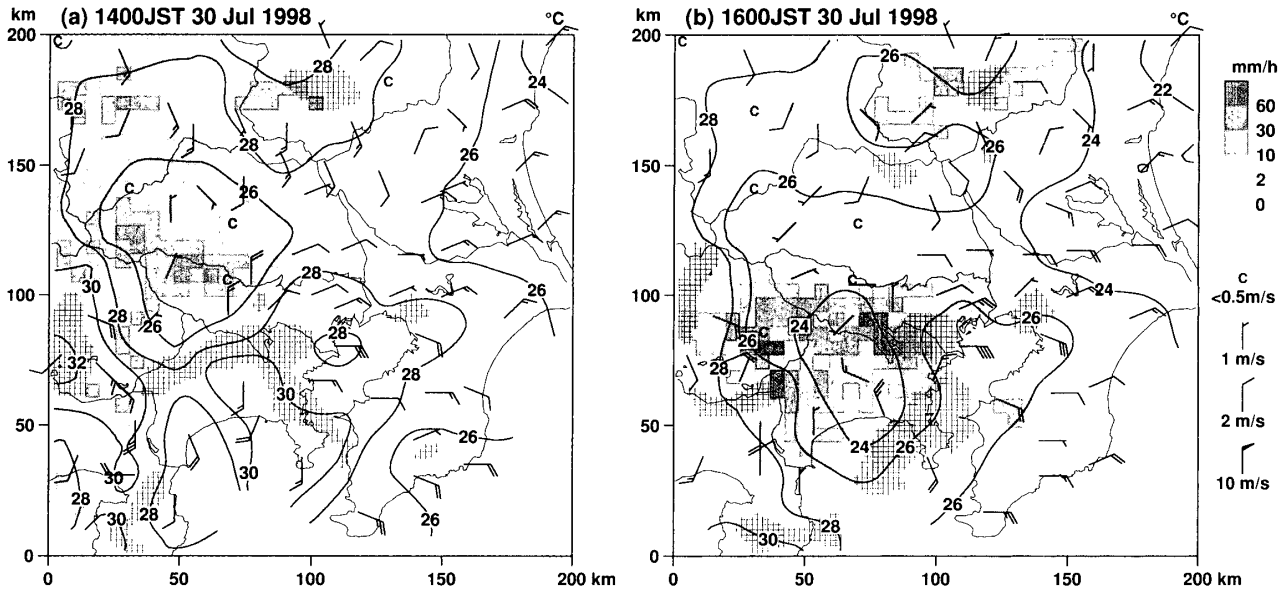
を内挿の際に考慮する. ここで, R_{ij} は観測点 i と j の間の距離, n は観測点数である.

気象要素の解析値 ϕ^A は,

$$\phi^A = \phi^G + \sum_{i=1}^n W(R_i) W_{Di} (\phi_i^O - \phi_i^G) / \sum_{i=1}^n W(R_i) W_{Di} \quad (3)$$



第4図 事例Cにおける練馬の(a)降雨開始1時間前から(d)30分後までの30分ごとの練馬を中心とする北西—南東線上の地上風(矢羽), その水平発散(点線)および海面補正した気温(実線)の分布. 矢羽と記号Cの凡例は第3図の通り. 矢羽は上向きが北東の風向を表す.



第5図 第3図と同様。ただし、事例Qにおける横浜の降雨開始時刻を基準にした結果。

で求める。ここで、上付き添え字 A , G および O は、それぞれ解析値、推定値および観測値を表す。ただし、気温の観測値は、 0.0065 K m^{-1} の気温減率で平均海面の高さに補正した温度とする。第1推定値は $\phi^G = 0$ として求めた ϕ^A とする。逐次修正は3回、すなわち(3)式の操作を4回行う。この結果、解析値と観測値の平均2乗誤差の平方根は、観測精度と同程度かそれ以下であった。

水平発散および鉛直渦度は、水平風速成分の解析値を用いて、2次精度の中央差分で求める。

3. 特徴的な事例の風と気温の水平分布

3.1 強化日の事例C (1999年8月24日)

9時には佐渡島付近に低気圧があり、東と南西方向にのびた前線を伴いながら、ゆっくりと東に移動していた。13～14時を中心に千葉県北部で降った強い雨は18時までにはほぼ終息した。一方、13～14時頃に群馬県北部で発達した降水系は南東進し、19～20時にかけて23区に激しい雨をもたらした。

23区の降雨開始時刻(19:10)に最も近い19時とその2時間前の地上の風と収束域、海面補正した気温および解析雨量の水平分布を第3図に示す。2時間前の17時には(第3図a)、鹿島灘からの東寄りの風と相模湾からの南寄りの風が23区付近で収束し、F02が示した「E-S型風系」になっていた。30°C以上の高温域は東京湾沿岸から西にのび、23区付近は収束域と高温域が一致する地域であった。群馬県北部で発達した降水

系は同県南部まで南下しており、降水系の下には低温域(冷氣プール)が形成されていた。

降雨開始時刻頃の19時になると(第3図b)降水系はさらに南下し、23区を覆い始めた。降水系とともに冷氣プールも南下した。冷氣プール内の南側には発散風があった。一方、東京湾沿岸の高温域にある大手町や越谷では依然東寄りの風が吹いていた。冷氣プールと高温域の間には大きな気温勾配に加え強い収束が生じ、この収束が降水系の降雨強化を促したと見られる。発散風は、気温勾配の大きい冷氣プール外縁までのプール内にあったことから、その外縁をガストフロントとする冷氣外出流であったと考えられる。

冷氣プールと収束・発散域の移動を詳細に見るため、練馬の降雨開始1時間前から30分後までの練馬を中心とする北西—南東線上の地上の風と水平発散および海面補正した気温の分布を第4図に示す。1時間前の17時50分には(第4図a)、練馬の北西60～70 km付近を底とする冷氣プールの中に、最大 $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 程度の大きさの発散があった。冷氣プール内の気温勾配は降水系の進行方向前面(南東側)で大きく、その付近に弱いながら収束があった。練馬の北西30 km付近の高温域内の収束は、主に、第3図aで顕著に見られるE-S型風系による収束である。

18時20分になると(第4図b)冷氣プールは20 km程度練馬に近づき、冷氣プールの気温が下がるとともにプール内の発散は強まった。練馬の北西30 km付近に達した冷氣プール前面の収束も、ピーク値 -6×10^{-4}

s^{-1} 程度に強くなった。30分前と比べて収束がこれほど強くなったのは、冷氣プール内の発散風と北西30 km 付近に収束していた E-S 型風系が重なったためであろう。降雨開始時刻の18時50分には(第4図 c), 冷氣プールの底の位置は30分前からあまり移動していないが、収束域は強さを持続しながら冷氣プール前面とともに練馬に到達した。

19時20分になると(第4図 d) 冷氣プール内の発散域は分裂し、発散量のピーク値も小さくなった。また、冷氣プールの気温はやや上昇し、前面の気温勾配は緩やかになりつつあった。これらは、降水系が衰弱し始めていたことを反映していると思われる。

3.2 非強化日の事例 Q (1998年7月30日)

23区よりも横浜で降雨が強まった非強化日の事例を示す。この日、横浜地方気象台では開設以来最高の1時間降水量を観測した。9時には佐渡島付近に寒気を伴った低気圧があり、午前から山岳部を中心に降雨が散発した。10時前に埼玉県西部の山岳部に発生した降水系は13時以降ゆっくりと南東進し、16~17時にかけて横浜付近に激しい雨をもたらした。

第5図に横浜の降雨開始時刻(15:50)に最も近い16時とその2時間前の第3図と同様の水平分布を示す。2時間前の14時には(第5図 a), 鹿島灘からの東寄りの風と相模湾からの南寄りの風があり、大雑把に見ると事例 C に似ていた。しかし、鹿島灘からの風は府中付近まで侵入しており、東京湾沿岸の観測点も東寄りの風になっていた。横浜や府中の風向が南寄りでなかった点で E-S 型風系ではなかった(以下、E 型風系)。強い収束域は23区ではなく神奈川県東部にあった。30°C以上の高温域は三浦半島から海老名付近で、収束域と高温域はほぼ一致していた。東京都から埼玉県の山岳部にあった降水系の下には冷氣プールが形成されていた。冷氣プール内には発散風があり、南の高温域との間に大きな気温勾配、強い収束があった。

横浜の降雨開始時刻頃の16時になると(第5図 b), 降水系、冷氣プールおよび発散風は神奈川県内で南下した。冷氣プール前面にあたる三浦半島付近の収束は強まったが、23区の収束はそれほどではなかった。

この日が強化日とならなかったのは、降水系の進路が横浜方面にそれたためである。深森・中嶋(1981)や堀江・遠峰(1998)は、降水系は収束と高温が一致する地域に向かって移動する傾向があることを示した。東京湾沿岸で降雨が始まる2時間前、事例 C では23区内(第3図 a), この事例では神奈川県内(第5図

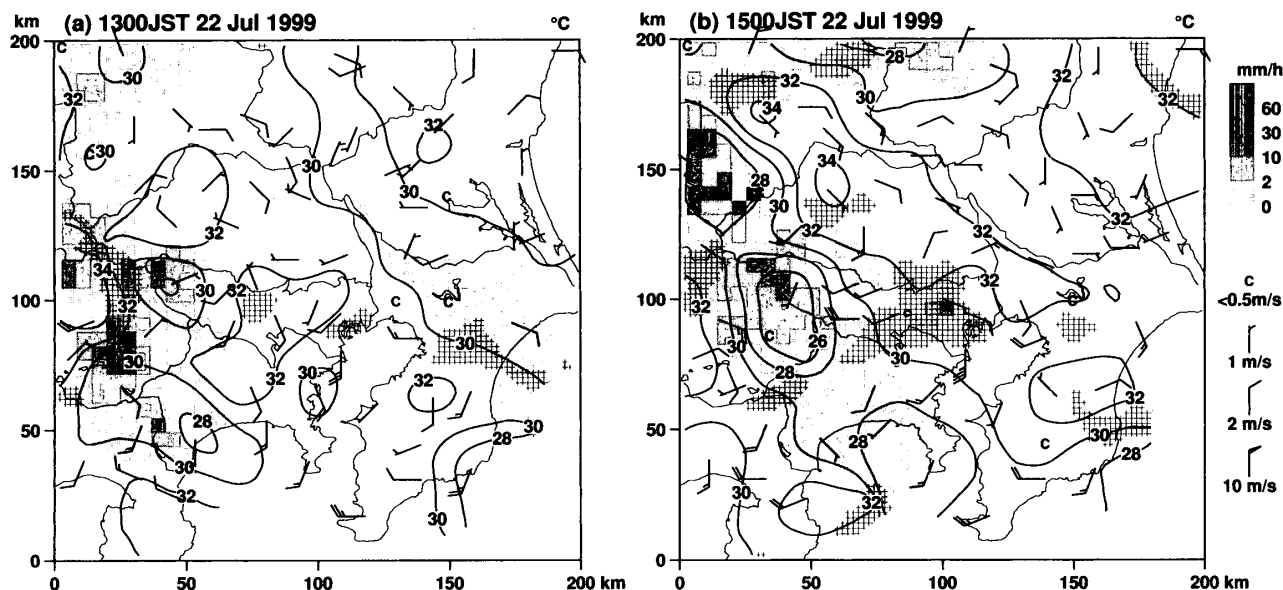
a)に収束かつ高温域があった。山岳部で発生した降水系は、確かに、その収束かつ高温域に向かって移動した。これら2つの事例から、海風系の局地風の収束域に向かって降水系が移動し、その降水系に伴う発散風が局地風の収束を増強することが、降水系の降雨強化機構の1つのパターンであることがわかった。

3.3 強化日の事例 B (1999年7月22日)

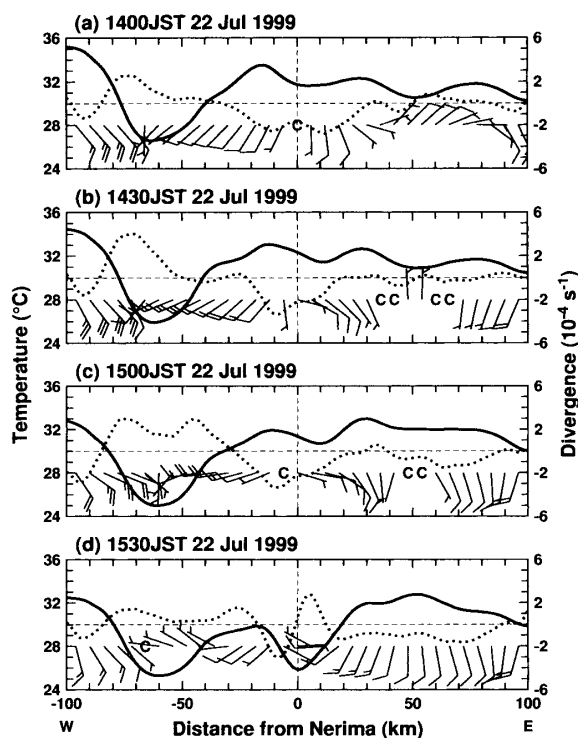
この日は、記録的な豪雨により死者を出すほどの浸水被害が都内であった日の翌日である。南から太平洋高気圧が張り出していたが、9時には鹿島灘沖から仙台付近を通して秋田沖まで、東北地方を斜めに横断するように前線が停滞していた。関東地方では暖湿流が流れ込んで午前から弱い降雨が散発した。12時前に東京都西部の山岳部に発生した降水系は、ほとんど移動することなく15時頃まで発達あるいは強さを持続した。その降水系が衰弱し始める頃、これとは無関係のように練馬付近に降水系が現れた。

第6図に23区の降雨開始時刻である15時とその2時間前の第3図と同様の水平分布を示す。2時間前の13時を見ると(第6図 a), 房総半島の九十九里浜から北西の帯状の地域は、弱い降水系が南下した影響で気温がやや低く、鹿島灘からの風は23区まで侵入しにくい状況になっていた。しかし、相模湾からの南寄りの風は府中や練馬付近まで侵入し、府中の北西や、東京湾からの南寄りの風との間の23区南部に、強い収束域を形成した。東京都西部の山岳部にあった降水系は、弱い冷氣プールを伴っていた。この冷氣プールを取り囲むように、32°C以上の高温域が東京都、埼玉県および山梨県に存在した。

降雨開始時刻の15時になっても(第6図 b), 東京都西部の山岳部の降水系はほとんど移動せず、冷氣プールの気温は26°C以下に下がった。このため冷氣プール外縁の気温勾配は大きくなったが、そこに強い収束域はなく、むしろその付近で風は強くなっていた。この風は事例 C のような冷氣プールの外縁をガストフロントとする冷氣外出流(第3図 b)とは異なり、海陸風のように気温勾配による気圧傾度力で引き起こされた風と考えられる。この風は、東は少なくとも府中付近まで達して23区付近の収束を強めた。この収束域の中にある練馬付近に、新たな降水系が出現した。ところで、北や東の浦和・越谷・大手町を見ると、この降水系に収束するように風向が変化した。これは、発生・発達期の積乱雲内の上昇流に伴う収束と見ることができ、しかし、変化は降雨開始1時間前の14時頃から



第6図 第3図と同様. ただし, 事例Bにおける結果.



第7図 第4図と同様. ただし, 事例Bにおける練馬を中心とする西-東線上の結果. 矢羽は上向きが北の風向を表す.

始まっており, 単独の積乱雲の寿命(高々1時間程度)を考えると, そのほかの現象, 例えばヒートアイランドがその変化に関与した可能性もある.

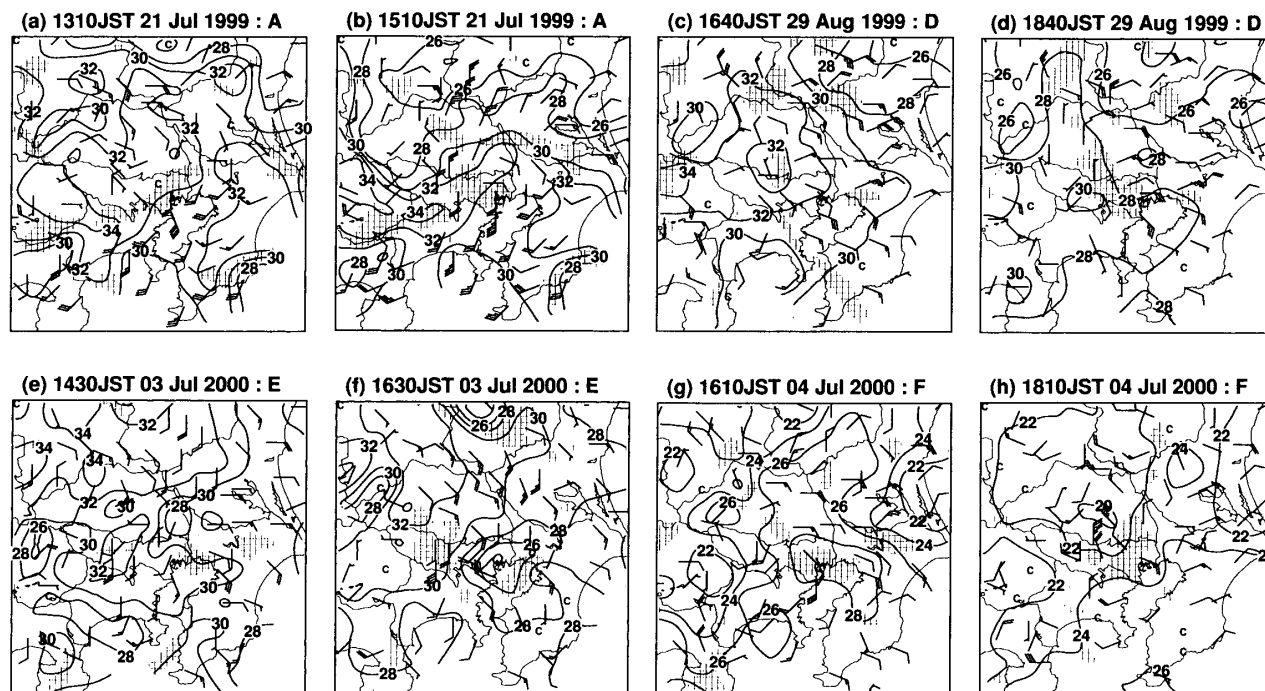
第7図に練馬の降雨開始1時間前から30分後までの練馬を中心とする西-東線上の第4図と同様の分布を

示す. 1時間前の14時には(第7図a), 練馬の西60 km 付近の山岳部を底に冷氣プールがあり, その中に $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ を超える大きさの発散があった. 一方, 練馬の西15 km 付近にはひときわ高い高温域があり, ほぼ同じ位置にピーク値 $-2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 程度の大きさの収束があった. この収束は, 当初は相模湾・東京湾からの南風(以下, S型風系)による収束であった.

14時半になっても(第7図b)降水系の移動はなく, これにより冷氣はほぼ等方的に流れ出すため, 冷氣プールは底を軸に概ね対称の気温分布になっていた. 冷氣プール内の発散は, プールの気温が下がるとともに強まった. しかし, 冷氣プールの東側外縁の収束は非常に弱かった. 降雨開始時刻の15時になると(第7図c)冷氣プールの気温はさらに下がり, プールからの西風は練馬付近まで達した. 冷氣プール外縁で, 収束ではなく発散が最も強くなったことから, 前述のように, この西風は気温勾配に起因する発散風であろう.

15時半になると(第7図d), 山岳部の冷氣プールの気温が上昇するとともにプール外縁の発散は弱まり始めた. 練馬の気温は, 30分前と比べて約 6°C (最初の10分間に 5°C)下がった. 練馬の西15~40 kmの地域は比較的高温を維持しており, 練馬の降水系が孤立していたことが気温分布からも窺える.

降水系の降雨強化機構に, もう1つのパターンがあることがわかった. すなわち, 遠方の降水系に伴う気温勾配に起因する発散風が, 海風系の局地風の収束を増強するパターンである. この場合, 海風系の局地風



第8図 強化日の事例における23区の降雨開始2時間前および降雨開始時刻の地上風(矢羽), その収束域(網掛け)および海面補正した気温(太い実線)の水平分布. (a), (c), (e) および (g) は降雨開始2時間前, (b), (d), (f) および (h) は降雨開始時刻. 日付の後のアルファベットは第1表の事例を示す. そのほかは第3図と同様.

の収束域に向かって降水系が移動する現象は重要ではない. 発散風を含む局地風のより具体的な役割は, ほかの事例を概観したあと第6章で考察する.

4. そのほかの事例の風と気温の水平分布

4.1 強化日の事例

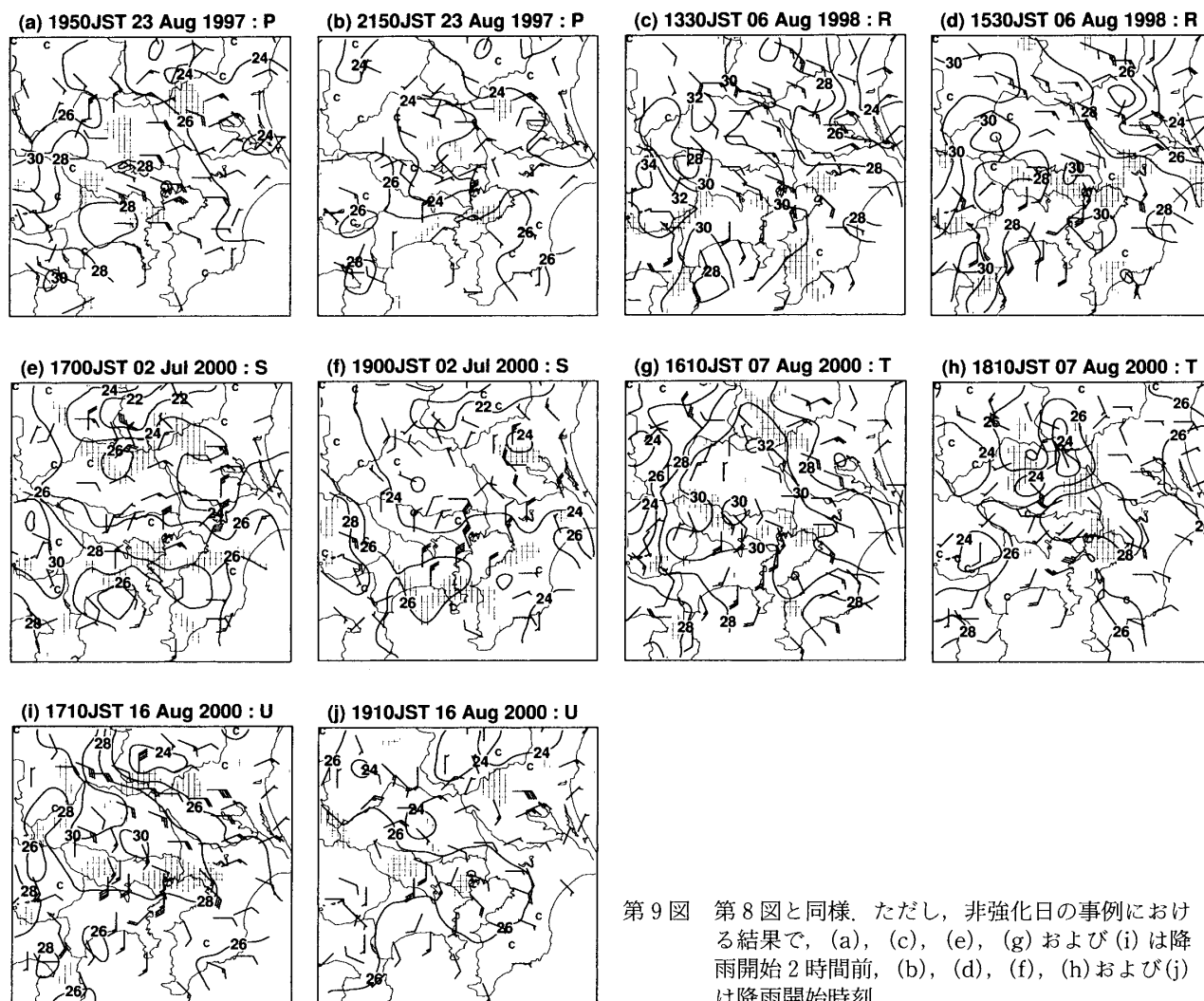
事例BとCを除く強化日の事例について, 23区の降雨開始時刻とその2時間前の地上の風と収束域および海面補正した気温の水平分布を第8図に示す. 事例Aの降雨開始2時間前は(第8図a), S型風系により23区付近は強い収束域であった. 気温は関東ほぼ一円 30°C 以上となっていた. 降雨開始時刻になると(第8図b), 栃木県や群馬県に形成された冷氣プールから, 気温勾配に起因する発散風が埼玉県を越えて23区付近に達し, その付近の収束を強めた.

事例Dの降雨開始2時間前は(第8図c), 鹿島灘方面から吹く東寄りの風と相模湾から吹く南西の風が, 房総半島南部から所沢付近にかけて顕著な収束線を形成していた. この収束線は14時頃からほぼ同じ位置にあった. 気温は鹿島灘から北の沿岸が低温であった. 降雨開始時刻になると(第8図d), その沿岸の冷氣は埼玉県東部まで侵入した. これまでの事例や似たような冷氣の侵入があった吉崎ほか(1998)の事例を見る

と, 冷氣は降水系に伴って移動した. しかし, この事例では降水系の侵入の事実にはなかった. また, この日はオホーツク海上を高気圧がゆっくりと移動し, 東寄りの風は終始安定していた. したがって, 冷氣は降水系や局地風ではなく, 主に総観場の北東気流に伴って侵入したと考えられる. 一方, 局地風と思われる相模湾沿岸の風は南風になり, 顕著な収束線は23区付近に北上した. この日の短時間強雨には, 局地風だけでなく冷たい総観場の風も関与したと見られる. 風系だけを見るとよく似た事例が小倉(1997)にある.

事例Eの降雨開始2時間前は(第8図e) E-S型風系で, 強い収束域はやや千葉県寄りにあった. 埼玉県東部には降水系に伴う 28°C 以下の弱い冷氣プールがあった. 降雨開始時刻には(第8図f) 大手町ですでに雨が降っており, そこを中心に冷氣プールが形成された. しかし, 23区の周囲には冷氣プール, それに伴う発散風は確認できない. 館野の21時のSSIは -3°C と(第1表)かなり不安定であったために, 海風系の局地風の収束だけで降雨に至ったと思われる. ただし, この日の23区内の最大10分間降水量は強化日の中で最も少なく, 23区外とのその差も 0.5 mm と最も小さかった.

事例Fの降雨開始2時間前は(第8図g), 23区付近



第9図 第8図と同様。ただし、非強化日の事例における結果で、(a)、(c)、(e)、(g)および(i)は降雨開始2時間前、(b)、(d)、(f)、(h)および(j)は降雨開始時刻。

はE-S型風系による強い収束域で、高温の地域でもあった。降雨開始時刻になると(第8図h)、埼玉県内に移動した降水系に伴う冷氣プールの中に冷氣外流と見られる発散風があり、23区付近の収束を強めた。

4.2 非強化日の事例

事例Qを除く非強化日の事例について、第9図に23区の降雨開始時刻とその2時間前の第8図と同様の水平分布を示す。事例Pの降雨開始2時間前は(第9図a)顕著なE型風系で、23区は平均的には発散域になっていた。降雨開始時刻には(第9図b)、東京都と埼玉県を覆って24°C以下の弱い冷氣プールがあり、その南側の羽田や海老名に発散風が見られた。

事例Rの降雨開始2時間前は(第9図c)E-S型風系であったが、23区内に強い収束域はなかった。降雨開始時刻には(第9図d)、東京都西部に28°C以下の弱い冷氣プールが広がったが、発散風は確認できない。23区付近の収束が2時間前より強まったのは、発散風

が加わったからではない。

事例Sの降雨開始2時間前は(第9図e)、栃木県や茨城県に形成された24°C以下の冷氣プールからの発散風が広い範囲に見られた。この影響もあるが風系はE型で、23区内に強い収束域はほとんどなかった。降雨開始時刻になると(第9図f)、冷氣プールは栃木・群馬・茨城・埼玉県にわたって大きく広がり、そこからの発散風は東京湾沿岸を中心に吹いていた。

事例Tの降雨開始2時間前は(第9図g)、23区付近はE-S型風系による強い収束域の1つで、高温の地域でもあった。降雨開始時刻には(第9図h)、埼玉県北部に冷氣プールがあるが、発散風らしき風は認められない。この日の降雨開始2時間前の風と気温の特徴は強化日に類似するものであったが、強化日との違いは顕著な発散風がなかったことである。

事例Uの降雨開始2時間前も(第9図i)、E-S型風系により23区付近は強い収束域になっていた。降雨開

第2表 短時間強雨日の風と気温の特徴の概要.

分類	事例	図番号	降雨開始 2 時間前			降雨開始時刻	
			風系	発散 ¹⁾ (10^{-4} s^{-1})	相対気温 ²⁾ ($^{\circ}\text{C}$)	発散風 ³⁾	発散 ¹⁾ (10^{-4} s^{-1})
強化日	A	第8図 a, b	S	<u>-2.1</u>	-2.3	○	<u>-2.6</u>
	B	第6図 a, b	S	<u>-1.2</u>	-2.2	○	<u>-2.6</u>
	C	第3図 a, b ⁴⁾	E-S	<u>-1.6</u>	-1.8	○	<u>-2.7</u>
	D	第8図 c, d	E-S	<u>-1.1</u>	-2.2		<u>-2.6</u>
	E	第8図 e, f	E-S	<u>-1.2</u>	-3.1		<u>2.2</u>
	F	第8図 g, h	E-S	<u>-2.4</u>	0.2	○	<u>-2.7</u>
非強化日	P	第9図 a, b	E	0.83	-3.0	○	1.7
	Q	第5図 a, b ⁴⁾	E	-0.74	-2.8		-1.0
	R	第9図 c, d	E-S	-0.66	-3.2		<u>-1.8</u>
	S	第9図 e, f	E	0.14	-5.4	○	<u>2.1</u>
	T	第9図 g, h	E-S	<u>-1.6</u>	-1.0		<u>-1.7</u>
	U	第9図 i, j	E-S	<u>-2.5</u>	-1.3		<u>-1.3</u>

1) 23区(大手町から半径15 km の範囲) の平均発散量を示す. その値が $-1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 以下のときは下線を引いた.

2) 23区内の最高の海面補正気温から23区外で解析領域内のそれを引いた気温を示す.

3) “23区に影響を及ぼした” 発散風が確認できる場合は○, できない場合は空欄とする.

4) 図の時刻は23区の降雨開始時刻に近いが一致しない.

始時刻には(第9図 j), 鳩山付近に冷氣プールが形成されていたが, そこからの発散風は確認できない. ただし, 鳩山付近に向かう栃木県南部の冷氣プールからの発散風がこの時刻でも残っていた. この発散風が23区まで達しなかったのは, 降水系が南西進したように(第2図 b), 東寄りの風が非常に優勢であったからであろう. この日の前後, 東経150°付近の東の海上に停滞ぎみであった台風が影響したものと思われる.

5. 風と気温の特徴および発散と渦度の時間変化

5.1 風と気温の特徴の要約

短時間強雨日の風と気温の特徴の概要を第2表に示す. 降雨開始2時間前の風系はE-S型が多かった. ただし, 強化日にはS型風系, 非強化日には23区の収束が比較的弱くなるE型風系もあった. F02は降雨開始3時間前にはE-S型風系が圧倒的に多いことを示した. これら2つの結果をあわせると, 降雨開始3時間前から2時間前にかけて相模湾からの風が優勢になると強化日, 鹿島灘からの風が優勢になると非強化日になる傾向があることが示唆される.

このような風系による降雨開始2時間前の23区の平均発散量は, 強化日は6件とも $-1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 以下であった. 一方, 非強化日にそれ以下になったのは6件中2件のみである. 周辺地域の最高気温との差をとった23区の相対気温は, 強化日の方が非強化日より高くなる傾向にあった. 特に最も大きな10分間降水量を

観測した事例Fで相対気温は正, すなわち23区内の気温が解析領域内で最も高くなった.

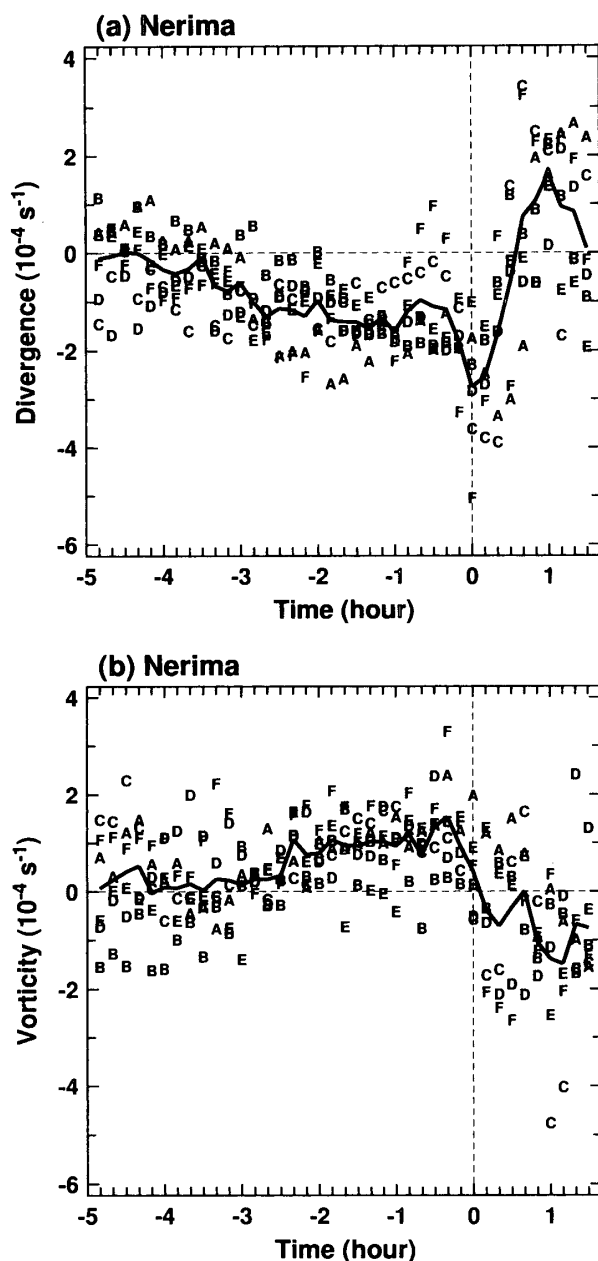
降雨開始時刻に発散風が確認できた事例は必ずしも多くはない. これはF02も指摘している. しかし, 強化日6件のうち4件で発散風と見られる風が吹き, 23区平均の収束は $-2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 以下に強くなった. 一方, 非強化日にも6件中2件で発散風が確認できた. しかし, その2件とも収束は強まらなかった.

事例PからSのように発散風の有無に関係なく降雨開始前の収束が弱い場合や, 事例TやUのように降雨開始前の収束は強くても発散風による収束の増強がない場合は, 強化日になりにくいことがわかる. 発散風が確認できない事例DやEのような例外もあるが, 降雨開始前の海風系の局地風による強い収束と, 降雨開始頃の発散風による収束の増強がそろったときには, 降水系の降雨強化が起こることが示された.

5.2 発散と渦度の時間変化

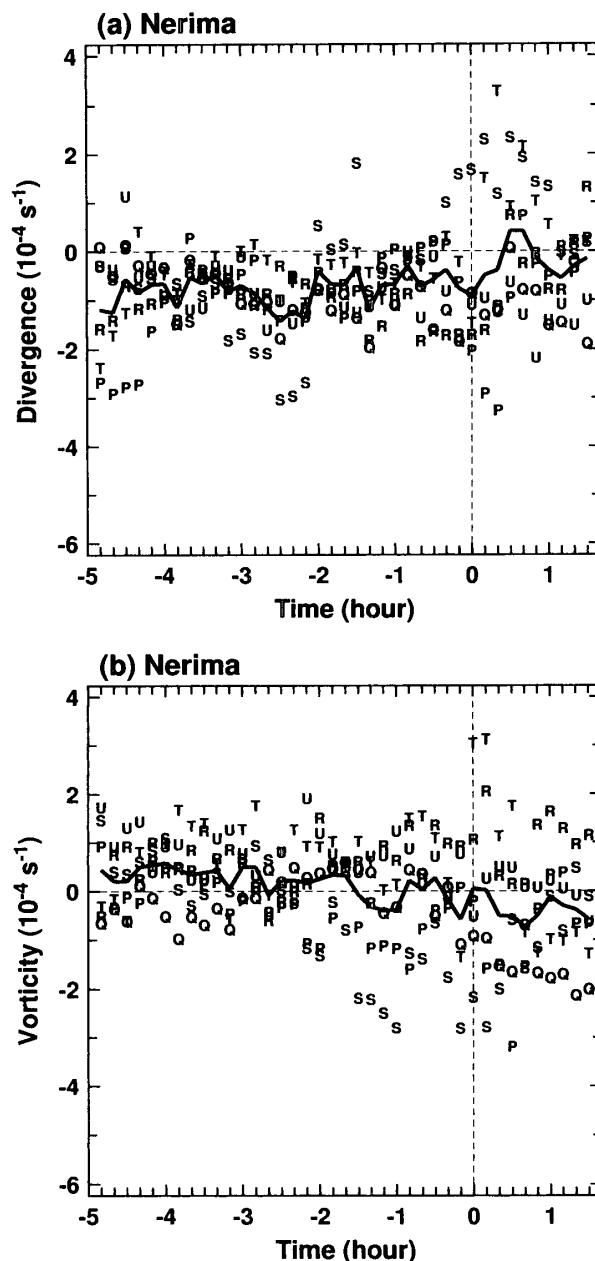
ほかの時間帯の収束・発散を見るため, 降雨開始(以下単に, 開始)時刻前後の水平発散と, 併せて鉛直渦度の時間変化を調べた. 大手町でも同様の傾向が得られているので, ここでは練馬の結果だけを示す.

第10図に強化日6件の時間変化を示す. 開始3時間20分前にほとんどの事例で収束になったあと, 収束の大きさは, 最初は徐々に, 開始時刻頃に急速に増加した(第10図 a). 事例Fの開始30分前頃の発散は, 大手町で1時間も前に雨が降り始めたことが影響したもの



第10図 強化日の練馬における降雨開始時刻前後の (a) 水平発散と (b) 鉛直渦度の時間変化。図中のアルファベットは第1表の事例を示す。実線はプロットした事例の平均を表す。

と思われる。開始後は開始前と比べてばらつきは大きいものの、開始1時間後にはすべての事例で発散に転じた。渦度は(第10図b)、開始2時間20分前にすべての事例で正になったあと、開始時刻頃までに $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 程度に増加した。この渦度の増加は、渦度方程式における惑星渦度の伸縮の項 ($-fD$; $f \approx 1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ はコリオリパラメータ、 D は水平発散) に $D \approx -1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ を代入すると、3時間程度で可能な増加である。と



第11図 第10図と同様。ただし、非強化日の結果。

ころが、開始時刻に収束が増強したとき、渦度は急速に小さくなった。伸縮の項によると渦度は大きくなるはずである。また、開始後の発散に対し渦度が負になった応答が速すぎる。これらの応答には、傾き（立ち上げ）の項や接近する降水系の構造が重要になってくることが考えられるが、アメダスだけでは検討できないので今後の課題としたい。

第11図に非強化日6件の時間変化を示す。開始前は、事例Sを除いてほとんど常に収束になっていた(第11図a)。しかし、強化日(第10図a)と比べると平均的に収束は小さかった。また、時間変動が大きく、開始

時刻にかけて増加する傾向はなかった。これらは、海風系の局地風による収束が安定していなかったこと、発散風による収束の増強がなかったことを表している。渦度は(第11図 b)正負にばらついており、開始前後で正負が逆転しない事例が多かった。

6. 考察

強化日の多くで、海風系の局地風と冷氣プールからの発散風がそろって確認できた。ここでは、降雨強化に対するこれら局地風の寄与を考察してみる。

23区で短時間強雨が起る前、強化日6件すべてにおいて、23区は海風系の局地風による強い収束域となった(第2表)。この強い収束は、降雨開始の3時間以上前から続いていた(第10図 a)。地上風の収束は、上昇流だけでなく水蒸気の集積をもたらす。神田ほか(2000)は、ある地域の降水量が増加する1~3時間前に、その直上のGPS可降水量が増加する確率が高いことを示した。この可降水量の増加は、降雨開始前の継続的な局地風の収束による水蒸気の集積に対応していると考えることができる。

23区で短時間強雨が始まる頃、強化日6件中4件で発散風が確認できた(第2表)。この発散風は、降雨開始頃の急速な収束の増強をもたらした(第10図 a)。地上風の収束の増強は、上昇流の増大をもたらす。増大した上昇流は、地上付近の空気塊をより高い高度まで持ち上げると推察できる。もしそれが自由対流高度まで達すれば、積乱雲が発生・発達し、降雨強化がもたらされるであろう。

降雨開始前の海風系の局地風は水蒸気を集積し、降雨開始頃の発散風は集積された水蒸気を上方に押し上げることで、積乱雲の発生・発達、降雨強化に寄与している可能性が示唆された。ただし、事例DやEのように、強化日でも発散風の存在が確認できなかった日もあった。これらの事例では、アメダスでは確認できない発散風があったかもしれないが、海風系の局地風と総観場の風の収束で、あるいは大気が極端に不安定であったためにその局地風の収束だけで、積乱雲の発生・発達に十分な条件が整ったと推測する。

7. まとめ

1) 23区でその周辺よりも降雨が強まった日(強化日)、そうでなかった日(非強化日)ともに、23区で降雨が始まる2時間前、鹿島灘からの東寄りの風と相模湾からの南寄りの風が吹くことが多かった。ただし、

強化日には相模湾からの風が、非強化日には鹿島灘からの風が優勢になる傾向があった。

2) このような海風系の局地風により、強化日には、降雨開始の3時間以上前から23区に強い収束が継続した。

3) 降雨開始時刻になると、その収束は急速に増強した。このとき、強化日6件中4件で、降水系に伴う局地風すなわち冷氣プールからの発散風が確認できた。

4) 非強化日には強い収束があっても継続せず、発散風があっても収束の増強は確認できなかった。

5) 発散風は、降水系からの冷氣外出流と、海陸風のように気温勾配による気圧傾度力で引き起こされるものがあつた。これに対応して、降水系の降雨強化機構は、海風系の局地風の収束域に向かって移動する降水系からの冷氣外出流が関与するものと、遠方の降水系に伴う気温勾配に起因する発散風が関与するものがあつた。

6) いずれにおいても、降雨開始前の海風系の局地風による強い収束の継続と降雨開始頃の主に発散風による収束の増強が、23区での降水系の降雨強化に結びつくことが示された。

謝 辞

この研究を行うにあたり、気象庁気象研究所の藤部文昭氏には、多くの有益な助言をいただきました。また、2人の査読者並びに担当編集委員の各氏には、解析内容についての著者の認識不足を補う貴重なご意見をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 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—都市効果についての検討—, 天気, 45, 7-18.
- 藤部文昭, 坂上公平, 中鉢幸悦, 山下浩史, 2002: 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, 天気, 49, 395-405.
- 深森信吾, 中嶋 隆, 1981: アメダスから求めた発散・温度分布とレーダーエコーの対応—1979年7月24日の雷雨—, 研究時報, 別冊33, 64-65.
- 堀江晴男, 遠峰菊郎, 1998: 関東地方における熱雷の発生と移動について—1995年夏期の解析—, 天気, 45, 441-453.
- 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.
 小倉義光, 1997: メソ気象の基礎理論, 東京大学出版会, 116-140.
 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.
 清水喜充, 1978: 客観解析法, 第6章, 数値予報(下), 気象研究ノート, (134), 251-272.

田口晶彦, 奥山和彦, 小倉義光, 2002: SAFIRで観測した夏期の関東地方における雷雨と大気環境 II: 安定度指数による雷雨の予測, 天気, **49**, 649-659.
 吉崎正憲, 1996: 雷雨の発生環境について, 天気, **43**, 734-738.
 吉崎正憲, 上清直隆, 瀬古 弘, 高山 大, 楠 研一, つくば域降雨観測実験グループ, 1998: 1995年8月10日に関東平野に発生した雷雨の解析, 天気, **45**, 19-33.

Characteristics of Local Winds Associated with the Intensification of Short-time Rainfall in the Tokyo Urban Area in the Afternoon of Summer Days

Mikio NAKANISHI* and Yukio HARA*

* Department of Earth and Ocean Sciences, National Defense Academy, Yokosuka 239-8686, Japan.

(Received 16 April 2002; Accepted 5 December 2002)

外部団体が主宰する賞への候補者推薦について

気象学会では、学会外の団体が主宰する学術賞等について、学会賞・藤原賞候補者推薦委員と奨励賞担当理事から成る「学会外各賞候補者推薦委員会」を設け、学会としての候補者を選考しています。特に、気象学との関連等を考慮して下記の賞に重点を置いています(五十音順; 詳しい募集要領は学会事務局にあります)。

- (1) 朝日賞(朝日新聞文化財団, 49巻7号 p. 578参照)
- (2) 井上学術賞(井上科学振興財団, 49巻4号 p. 302参照)
- (3) 猿橋賞(女性科学者に明るい未来をの会, 49巻7号 p. 560参照)
- (4) 島津賞(島津科学技術振興財団, 49巻4号 p. 293及び <http://www.shimadzu.co.jp/SSF/>参照)
- (5) 東レ科学技術賞(東レ科学振興会, 49巻4号

p. 298 及び <http://www.toray.co.jp/aboutus/tsf/kagaku.html> 参照)

- (6) 日産科学賞(日産科学振興財団, 49巻6号 p. 499及び <http://www.t3.rim.or.jp/~at02-nsj/>参照)
- (7) 三宅賞(地球化学研究協会, 49巻4号 p. 302参照)

上記委員会における候補者選考は、各賞の応募締切に間に合うよう、例年7月末頃に行われます。その際の参考にさせて頂くため、候補者としてふさわしい方をご存じでしたら6月末までに下記までお知らせ下さい。なお気象学会としての最終的な候補者決定は、上記委員会の判断にお任せ願います。

連絡先: 〒100-0004 東京都千代田区大手町1-3-4
 気象庁内

日本気象学会 学会外各賞候補者推薦委員会