

東京で観測された局地豪雨の実態調査： 2002年8月2日および2004年8月10日の事例の比較解析

Examining Local Heavy Rainfalls Observed in Tokyo:
Case Study of August 2 2002 and August 10 2004.

日下 博幸*¹ 羽入 拓朗*^{2,3} 縄田 恵子*⁴ 古橋 奈々*² 横山 仁*⁵
Hiroyuki Kusaka Takuro Hanyu Keiko Nawata Nana Furuhashi Hitoshi Yokoyama

*¹ 筑波大学計算科学研究センター Center for Computational Sciences, University of Tsukuba

*² 筑波大学自然科学類 College of Natural Science, University of Tsukuba

*³ 現所属 株式会社ウエザーニューズ Weathernews Inc.

*⁴ 筑波大学大学院生命環境科学研究科 Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

*⁵ 東京都環境科学研究所 Tokyo Metropolitan Research Institute for Environmental Protection

Corresponding author: Hiroyuki KUSAKA, kusaka@ccs.tsukuba.ac.jp

ABSTRACT

The present study describes essential features of the local weather when heavy rainfalls occur in the Tokyo metropolitan area. Case study was carried out in detail for the two heavy rainfall events: August 2 2002 (Case 1) and August 10 2004 (Case 2). The following characteristics are found. (a) The atmospheric stability was low while Japan Island was covered with Pacific high for both cases. (b) In the Case 1, the E-S type wind system was observed and surface winds from the Kashima bay, Tokyo bay, and Sagami bay converged in Tokyo during the several hours before heavy rainfalls occurred. (c) Additionally, it was found that the cold outflows enhanced the convergence. (d) On the other hand, such a convergence was not found in the Case 2, which causes the convective rainfalls quickly decreased.

キーワード: 局地豪雨, ヒートアイランド, 東京

Key Words : Local heavy rainfalls, Urban heat island, Tokyo

1. はじめに

近年, 豪雨災害の発生にともない, 都市豪雨に対する関心が急速に高まっている. 都市あるいはその周辺で発生する降水の研究は, これまでアメリカ合衆国で盛んに行われてきた. その中でも, 1970年代に行われた観測プロジェクト METROMEX (Metropolitan Meteorological Experiment)⁽¹⁾ は都市降水の実態解明に対する最大の取り組みとして広く知られている. 近年では, 衛星データ⁽²⁾や数値モデル^{(3), (4)}を用いた研究が行われている.

日本では, 長らくの間, 気候学的な研究が行われてきた⁽⁵⁾⁻⁽⁹⁾. それらの結果, 降水量・降水頻度ともに都心で多いこと, その傾向は暖候期の正午~夕方強い降水によって引き起こされていること, 長期的には増加傾向にあることがわかった. また, 東京の西側の山岳域で対流性降水が発生するような日には, 都市域では周囲に比べて降水頻度が

高くなることがわかった⁽¹⁰⁾.

近年, 事例研究も多く見られるようになってきた^{(9), (11)-(16)}. その結果, 都市豪雨の多くの事例で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が都心部で収束する風系(E-S型)が出現していることを明らかになった^{(9), (11)-(13)}. また, 都心上空の積乱雲は発達しやすく急成長する傾向にあること⁽¹⁴⁾, 豪雨発生前にGPS可降水量が増加すること⁽¹⁵⁾も指摘されるようになった. 数値モデルを用いた研究も最近見られるようになった⁽¹⁶⁾⁻⁽¹⁸⁾. Matheson and Ashie は, 都市が降水に対して降水量を増加させるような影響を与えることもあれば, 減少させるような影響を与えることもあるとの興味深い結果を報告している⁽¹⁷⁾. Kusaka et al.は, この理由として, 都市降水シミュレーションに対するカオス性を指摘し, 都市と降水の関係を結論づけることは従来の感度実験の手法では難しいと述べている⁽¹⁸⁾.

このように, 近年, 様々な視点から都市豪雨の事例解析

が行われているが、都市豪雨は事例毎に様々な特徴を持つため、一つでも多くの事例を解析することが望まれている。

本研究では、先行研究で指摘されている都市豪雨の二種類の典型パターン、すなわち、(i)夏季の日中に奥秩父や日光で発生し都心に移動してくるスコールラインに似た豪雨パターンと、(ii)夏季の日中に都市域で孤立的に発生する豪雨パターンを対象に典型事例をそれぞれ1つ選び、都市豪雨の実態把握と両者の違いを報告する。さらには、近年広く関心がもたれているヒートアイランドに着目して、都市豪雨発生前の東京およびその周辺の気温分布の実態も調査する。

2. 対象事例の選定と使用データ

2.1 対象事例の選定

本研究では2002年8月2日および2004年8月10日を解析対象事例とする。これらの事例を選んだ理由は以下の通りである。

2002年の事例は正午前後に関東平野を囲む山岳で対流性降水が発生し、午後になってから都心に向かって移動し、都市上空で再発達して豪雨をもたらすという太平洋高気圧下における都市降水の典型的な振る舞いのうちの一つの型⁽¹⁰⁾に近かった。とりわけ、災害をもたらした都市豪雨として有名な2000年7月4日の豪雨によく似ていた。2000年7月4日の事例の実態調査報告⁽¹⁹⁾と間接的に比較することにより、このタイプの都市豪雨に対する理解がより深まると期待される。

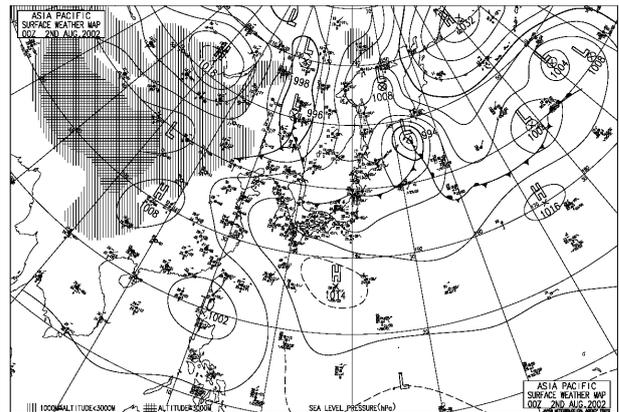
2004年の事例を選んだ理由は、正午前後に関東平野を囲む山岳で対流性降水が発生するというところまでは2002年8月2日の事例とよく似ているが、午後になっても平野部では組織的な降水系が発生・移動してこなくて、都心でのみ局地豪雨が観測されたという2002年8月2日の事例とはまた異なるタイプの都市豪雨の典型事例であったからである。

2.2 使用データ

本研究では、天気図・地上観測データ・高層観測データ・リモセン観測データを用いて都市降水の実態を調査する。具体的には、以下のデータを利用する。

- ・ 地上天気図
- ・ 500hPa 高層天気図
- ・ 高層ゾンデデータ
- ・ アメダスデータ
- ・ レーダーアメダス解析雨量データ
- ・ レーダーエコーデータ
- ・ 大気汚染測定局データ
- ・ 東京都水防災総合情報システム雨量データ

(a)



(b)

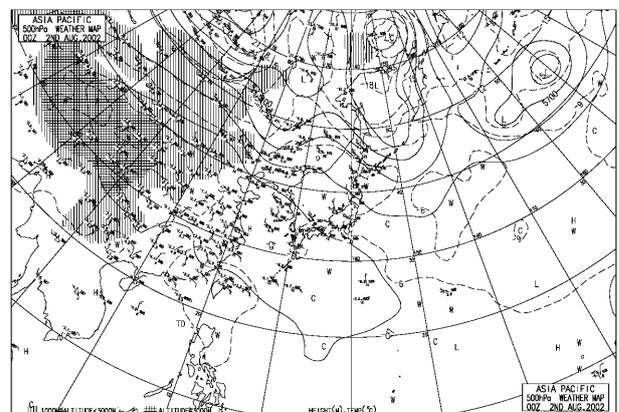


図1 2002年8月2日午前9時の天気図。(a) 地上天気図、(b) 500hPa 高層天気図。

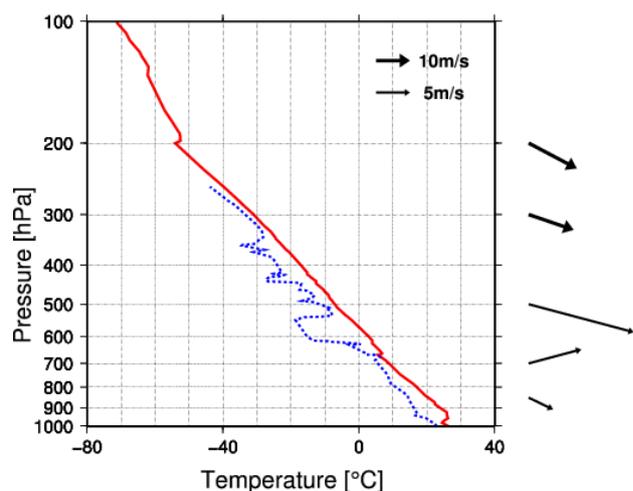


図2 2002年8月2日午前9時の気温(赤実線)・露点温度(青点線)・水平風(ベクトル)の鉛直プロファイル。

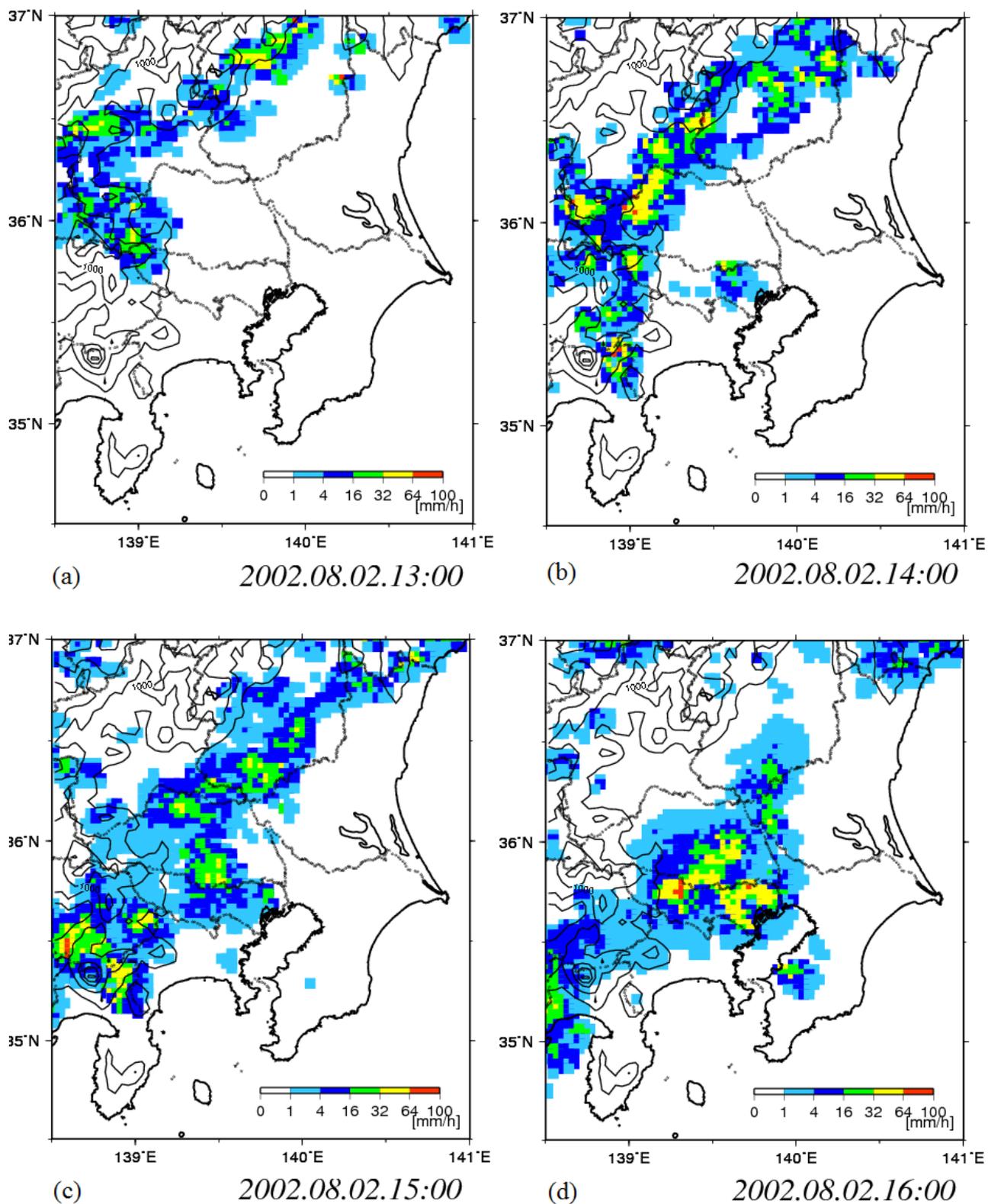
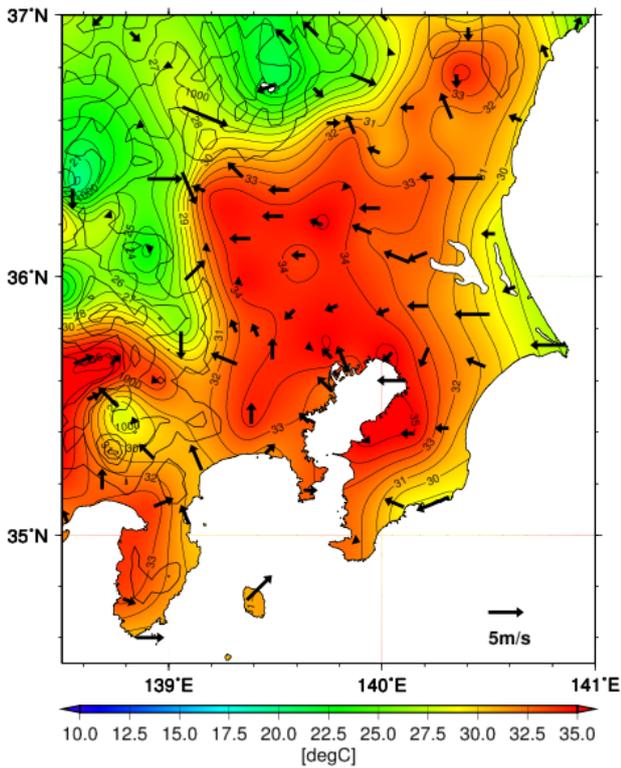
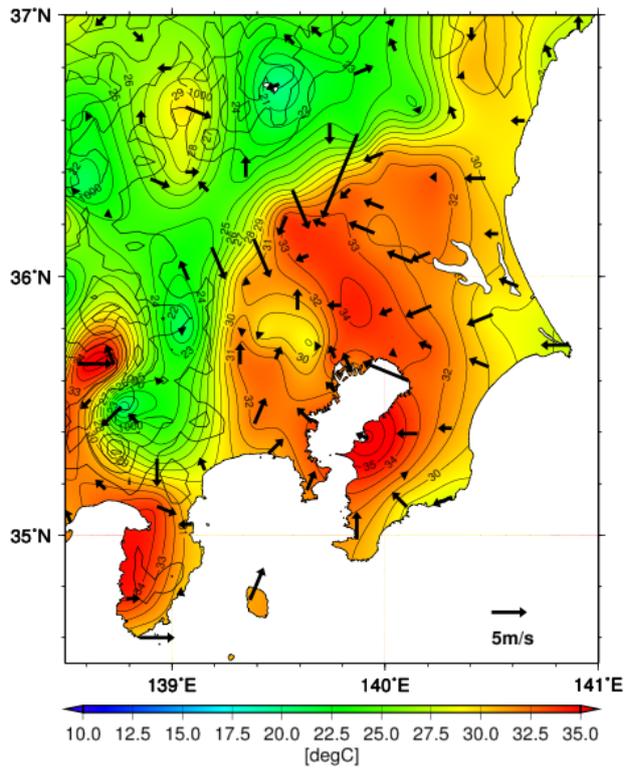


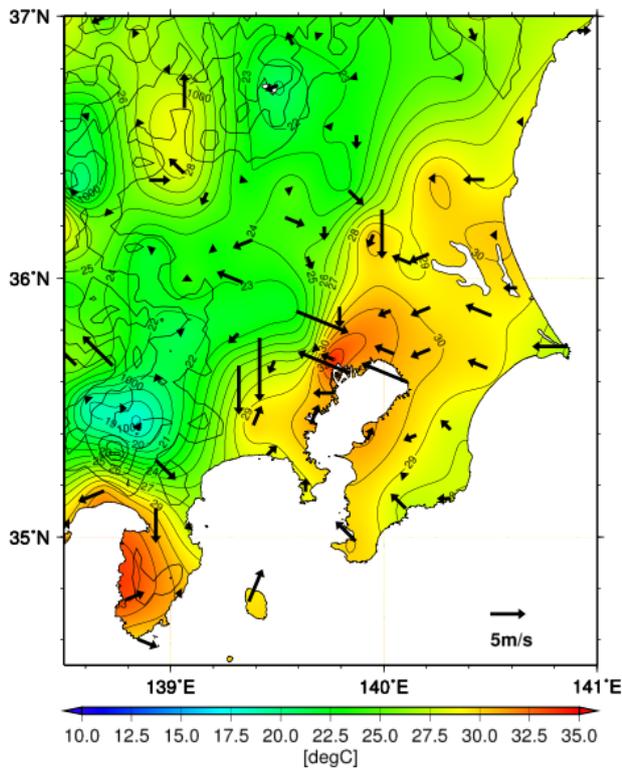
図3 レーダーアメダス解析雨量データから得た前1時間の積算降水量. 2002年8月2日の事例. (a) 13時, (b) 14時, (c) 15時, (d) 16時.



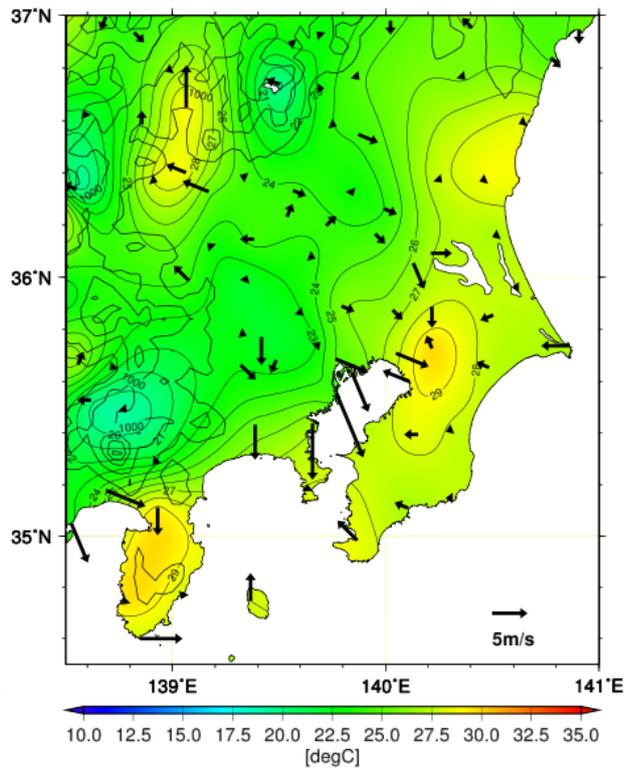
(a) AMeDAS Temperature and Wind
2002.08.02.13:00



(b) AMeDAS Temperature and Wind
2002.08.02.14:00



(c) AMeDAS Temperature and Wind
2002.08.02.15:00



(d) AMeDAS Temperature and Wind
2002.08.02.16:00

図4 アメダスデータから得た地上風と地上気温の水平分布。2002年8月2日の事例。(a) 13時, (b) 14時, (c) 15時, (d) 16時。

3. 2002年8月2日の事例

3.1 豪雨発生日の総観場

この日は、日本列島の南海上には高気圧があり(図 1a)、関東地方は午前中よく晴れていた。ただし、東北地方に寒冷前線が位置しており、500hPa 高度の高層天気図(図 1b)では関東地方の東海上に寒気が解析されていた。

午前 9 時の館野における気温・露点温度の鉛直プロファイルを見ると(図 2)、対流圏下層が湿潤、中層(600hPa 付近)は乾燥していたことがわかる。そして、対流圏の大気の成層安定度を示す指標の一つであるショワルターの安定指数(Showalter Stability Index, SSI)の値は-1.87であった。同様の指標としてよく知られている K-index の値は 38.77 であった。これらの結果は、この日の大気の状態は不安定であり、雷雨の発生の可能性が高かったことを示唆している。

3.2 降水量分布

図 3 にレーダーアメダス解析雨量データから得られた関東地方における 13 時から 16 時までの 1 時間前からの積算降水量(前 1 時間降水量)分布図を示す。正午頃(図省略)に山岳域を中心に所々で雨が降り始めると、降水域を広げながらこれらの降水系が合併し、13~14 時になると北東-南西方向に伸びる、きれいなスコールラインの様相となった。14 時には、これらの大きな降水帯とは別に都心に孤立した降水系が発生した。その後、山岳域で雨を降らせていた降水帯がやや弱まりながら少しずつ南下し平野部に移動した。そして、都心で発生した降水系と合併し、16 時になると東京都の平野部全域を覆うようになり、強い降水が観測された。このとき 1 時間降水量としてはピークを迎え、世田谷では最大 48mm/h、練馬では 33mm/h を記録した。その後降水系は引き続き南下し、20 時には神奈川県南部を通過し、21 時には太平洋上へと抜けた(図省略)

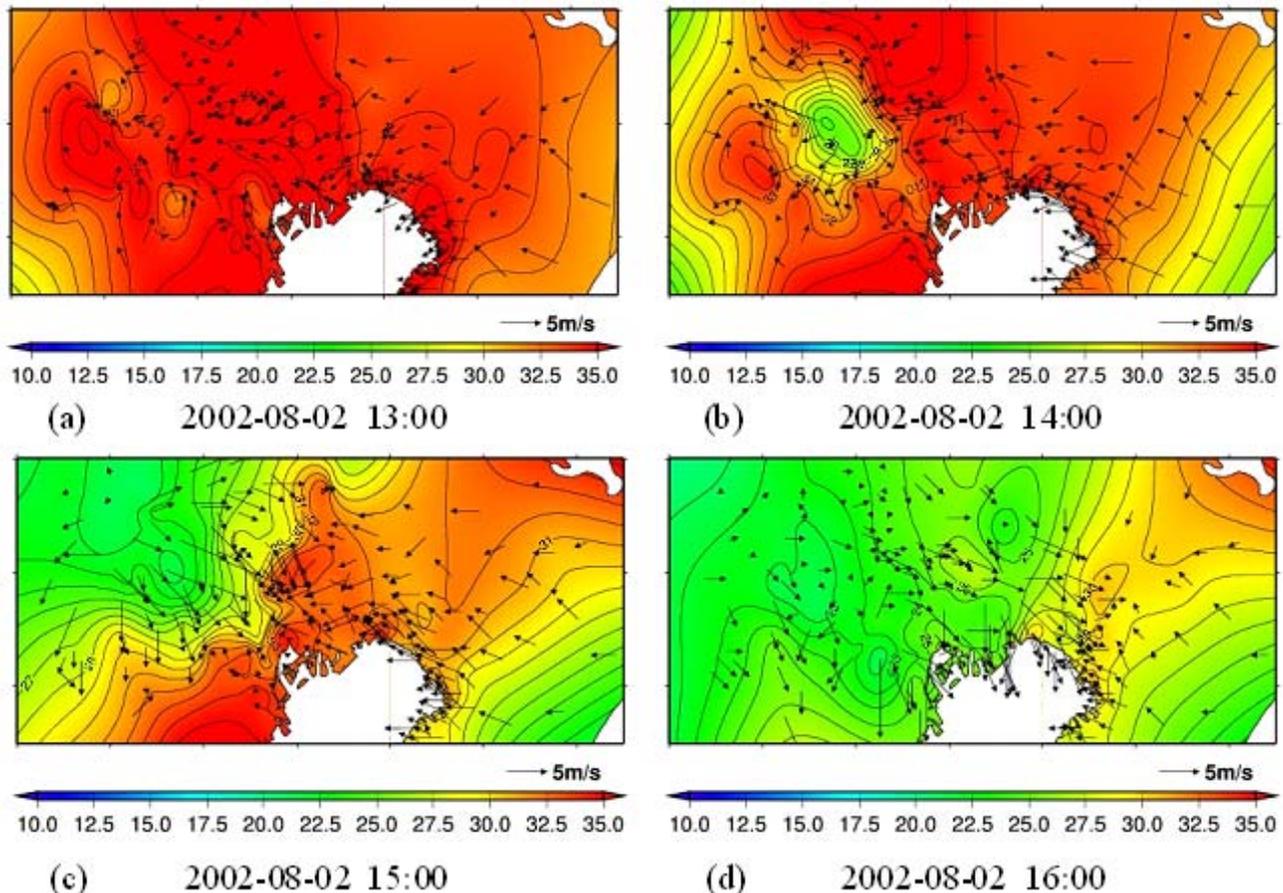


図 5 大気汚染測定局データから得た地上風と地上気温の水平分布。カラースケールは図 4 と同じ。2002 年 8 月 2 日(a) 13 時, (b) 14 時, (c) 15 時, (d) 16 時。

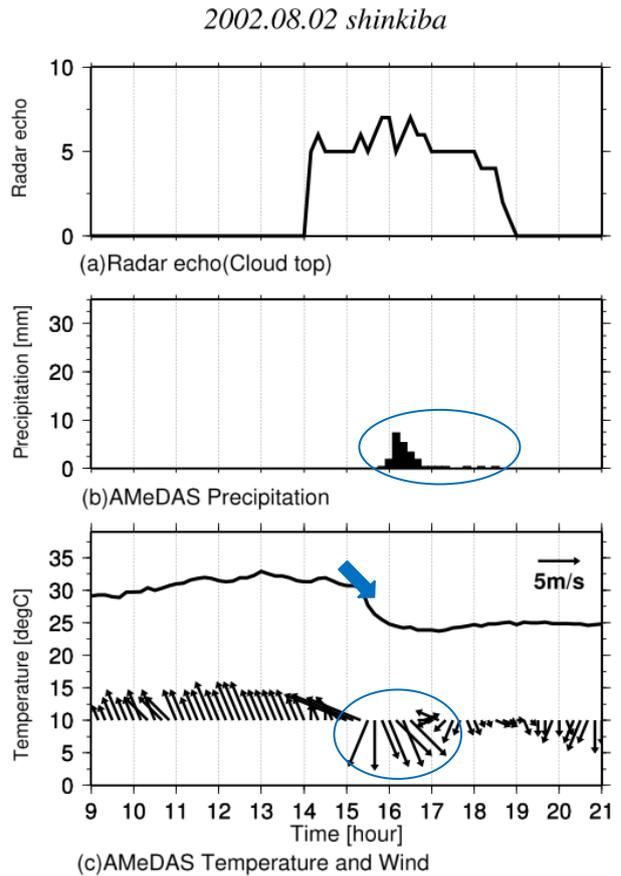
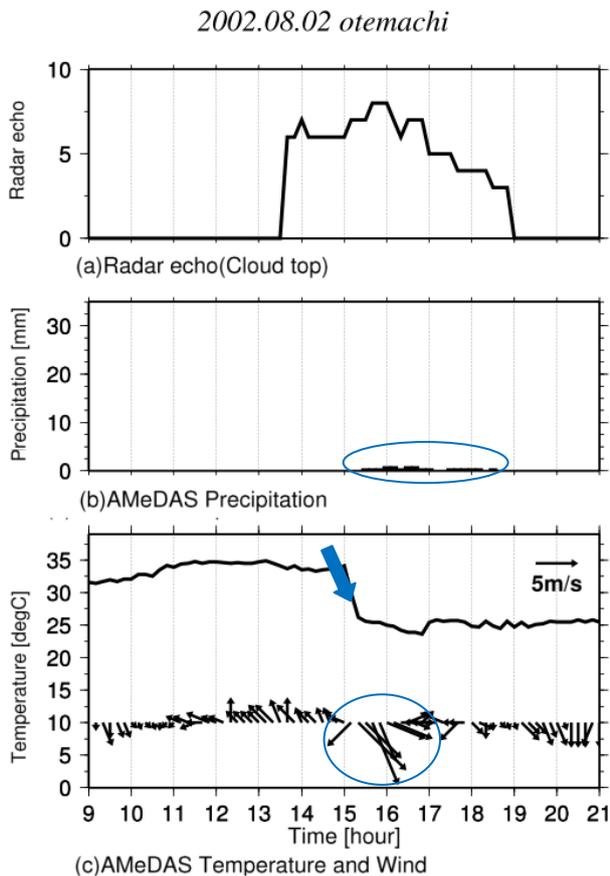
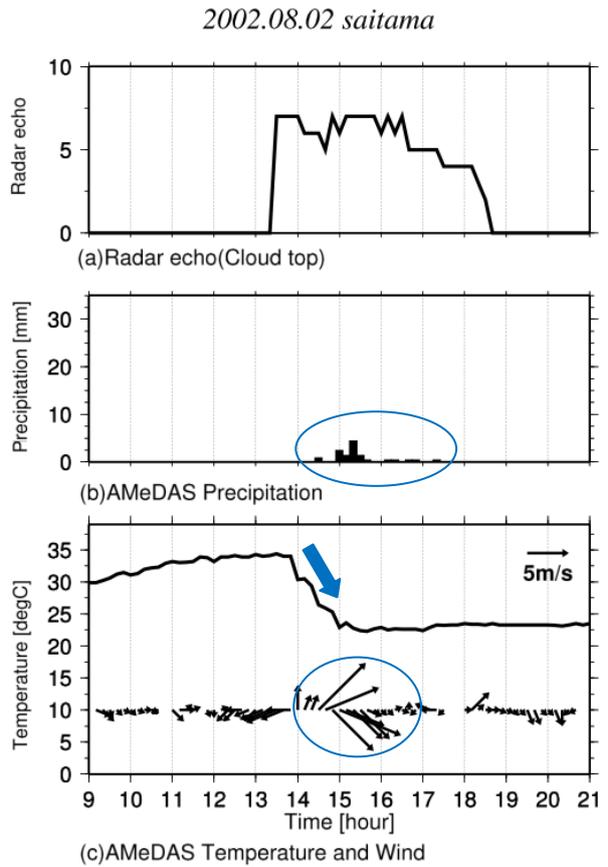
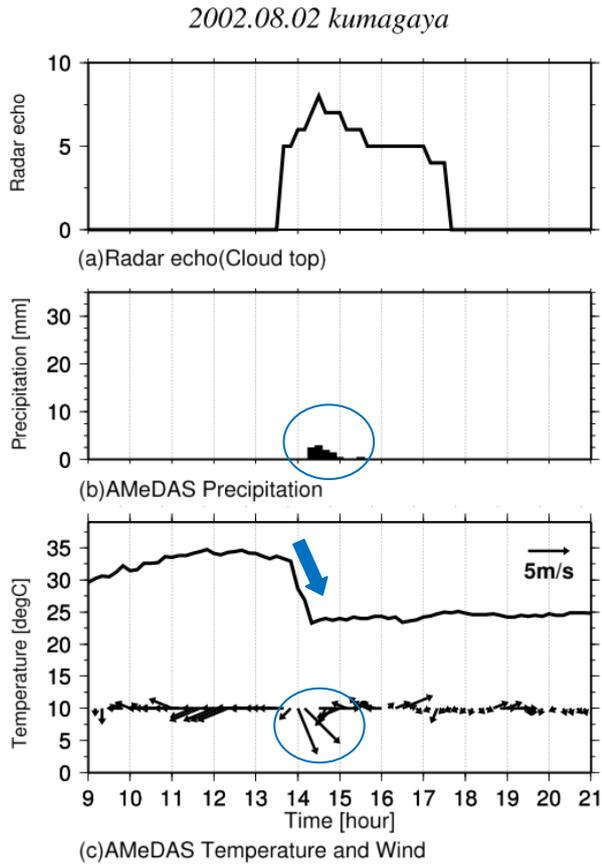


図6 熊谷, さいたま, 大手町, 新木場におけるレーダーエコー, 降水量, 気温, 風の時系列.

3.3 地上風と地上気温の水平分布

図4にアメダスデータから作成した地上風系と地上気温の分布を示す。11時過ぎ頃から、鹿島灘からの東寄りの風と相模湾からの南寄りの風、さらには東京湾からの南東風が強まり、3方向からの海風が、東京都で収束している様子となった。13時の分布図を見ると地上気温、地上風とも、いわゆるE-S系の風が吹く日の典型的なパターンを示していることがわかる。この日の気温は朝の段階から高く、埼玉県西部や東京23区周辺では35度を超える地点もあったこと、高温域の内部でもさらに高温域と低温域が存在していたことが特徴的であった。注目すべき点は、15時まで都心には明瞭なヒートアイランドが見られたこと、そしてその北西部にはまとまった低温域があり、そこから発散風が吹き出していたことである。

このような都心にあらわれた高温域とそこに吹き込む南風と東風、その北西部にあらわれた低温域とそこからの北よりの発散風、およびこれらの風の収束は、空間分解能が高い大気汚染測定局のデータからはっきりと確認することができる。図5をみると、23区の降水域に向かって南風、東風と北寄りの風が収束しており、降水域と収束域がほぼ一致していることがわかる。

また、各地の時系列(図6)をみると、場所によらず降水量が観測された直後に気温は5~10度低下し、風系はそれまでの南~東方向の風が北~西方向へと変化する傾向が見られた。雲頂高度に相当するレーダーエコー頂高度も場所によらず、その最大値はおおよそ同じ値となっていた。

4. 2004年8月10日の事例

4.1 豪雨発生日の総観場

この日、関東地方は高気圧に覆われていたが、サハリンには低気圧が存在し北日本には寒冷前線がかかっていた(図7a)。また、北日本上空には寒冷渦に近いトラフが存在し、このトラフに沿うように低温域が存在していた(図7b)。

館野における午前9時の気温・露点温度の鉛直プロファイルを見ると、600~700hPa付近の湿数は低くよく湿っていた、あるいは雲があったことを示唆している。しかしながら、2002年の事例ほど明瞭ではないが、その上の500~600hPa高度付近にやや乾燥した空気が存在していたこともわかる(図8)。これらのことから、この日の大気は不安定で雷雨が起こる可能性が高かったと考えられる。実際、このときのSSIの値は3.19と安定を示しているが、K-indexの値は32.64であり、不安定を示していた。

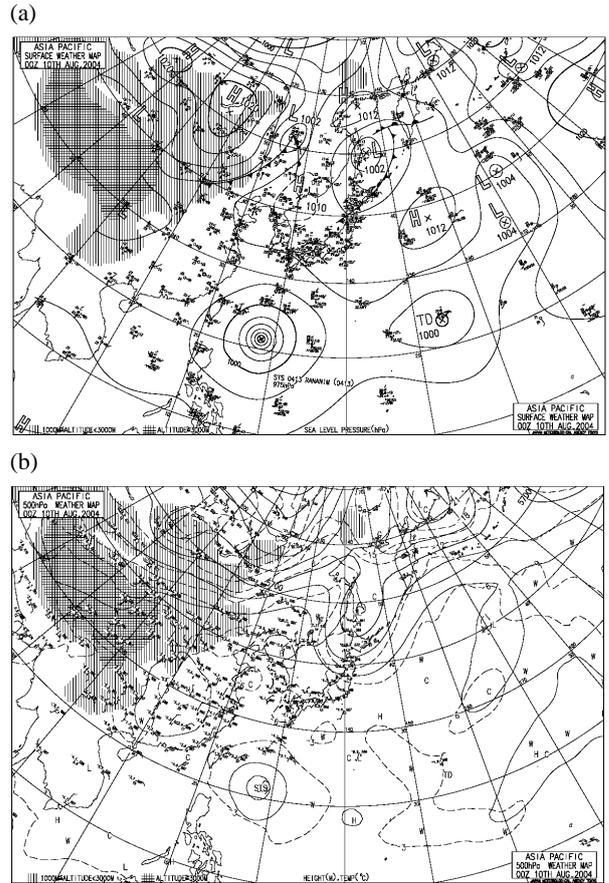


図7 図1と同じ。ただし、2004年8月10日午前9時の天気図。

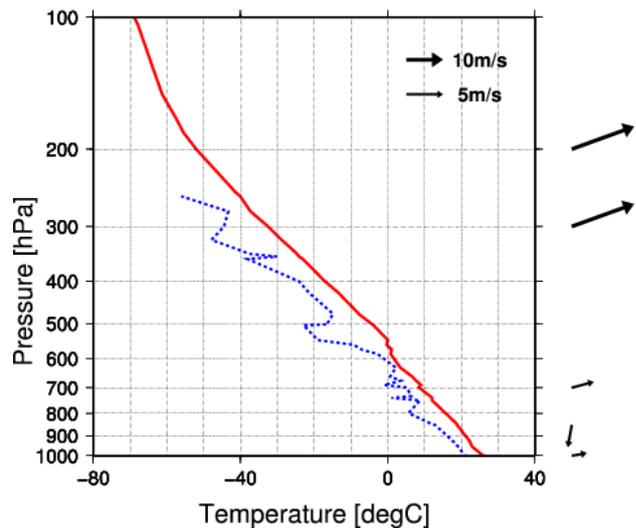


図8 図2と同じ。ただし、2004年8月10日9時。

4.2 降水量分布

レーダーアメダス解析雨量データから得られた前1時間降水量分布を図9に示す。12時ごろ小さい降水系が山岳域に発生し、その後それらが発達していった(図省略)。

その一方で、13時になると東京都心部で局地的な豪雨が発生した。アメダス観測網では捕らえ切れなく、そのためレーダーアメダスでも解析されていないが、東京都水防災総合情報システムはこの豪雨を観測していた。観測された降水量は、新宿で12時40分から13時30分の間に18mm、

中野で12時40分から13時20分の間に21mmであった(図10)。また、高密度観測データ METROS20 も12:30~13:30の間に、37mmの降水量をとらえていた⁽¹²⁾。これらの結果から、この豪雨が非常に狭い範囲で短時間に発生していたことがわかる。また、高密度観測データが短時間豪雨を捉えることに非常に有効なデータであることがわかる。

その後、この孤立した降水系は消滅した。また、この後もこのような小さな降水系が発生・消滅を繰り返したが、都心部で豪雨となることはなかった。

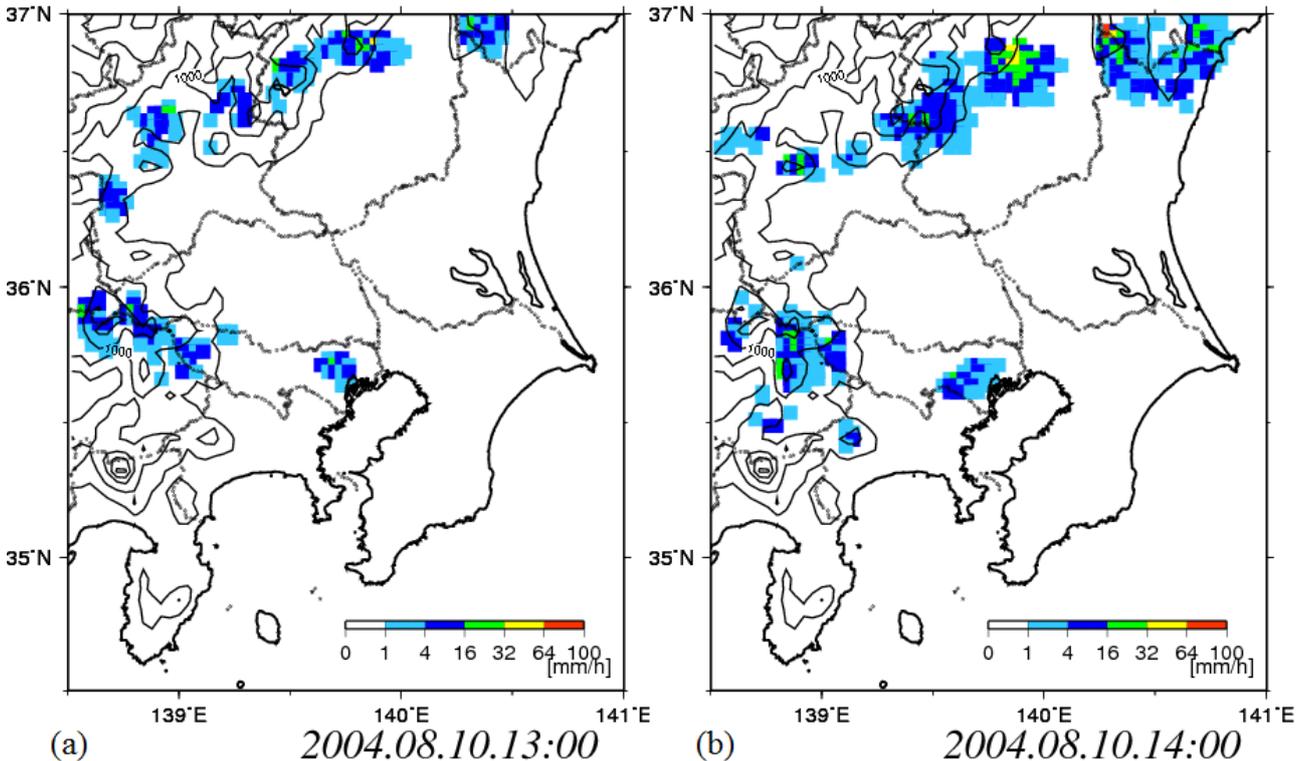


図9 図3と同じ。ただし、2004年8月10日の事例。(a)13時、(b)14時。

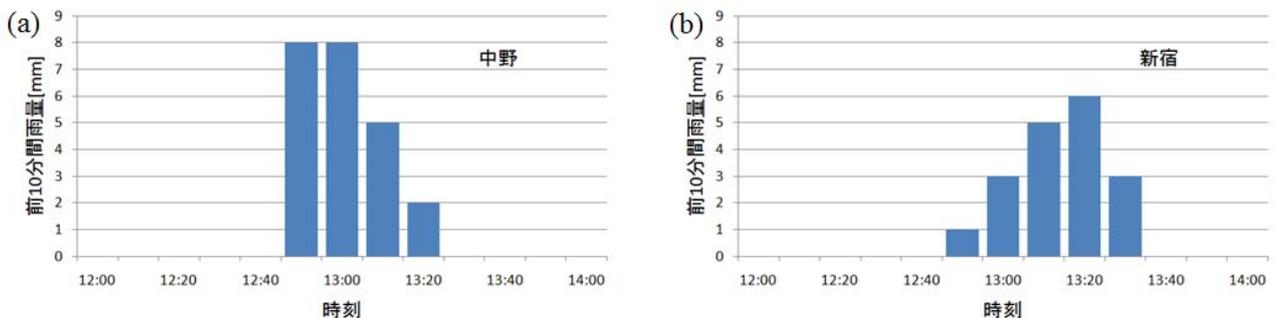
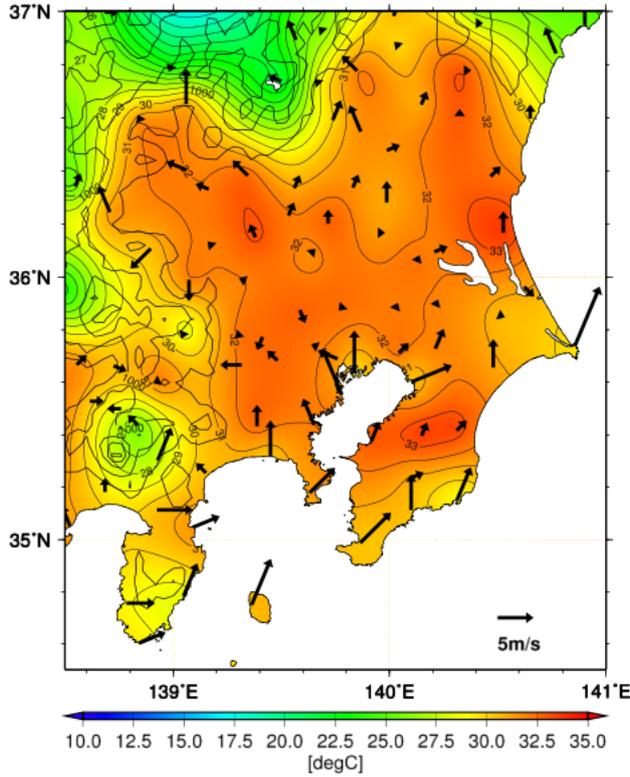


図10 東京都水防災情報システムデータから得られた2004年8月10日12時から14時までの前10分間降水量。(a)中野、(b)新宿。

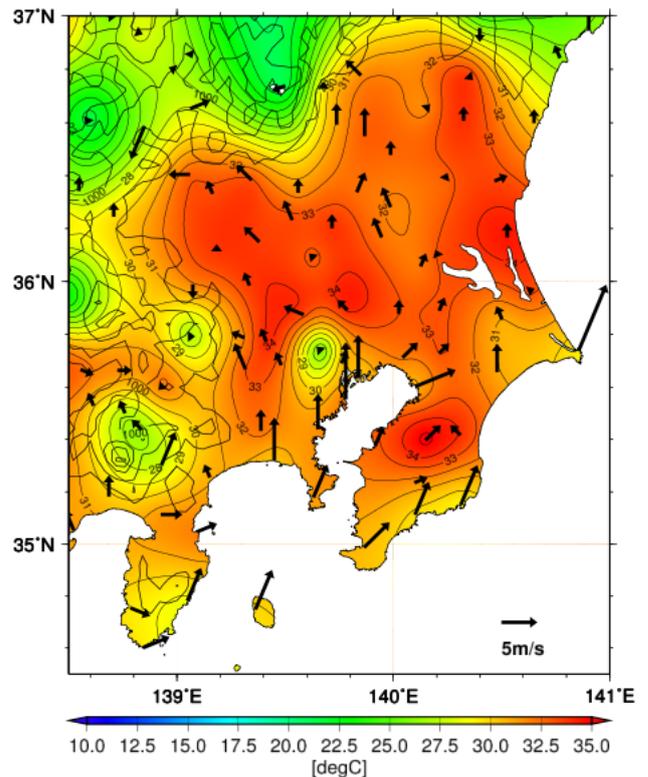
4.3 地上風と地上気温の水平分布

図 11 にアメダスデータから作成した地上風と地上気温の分布を示す。午前中から正午にかけて、平野全体において南風成分の卓越した風が吹いていた。13時に降水があったため、都心の気温は2002年8月2日の事例に比べて低かった。

大気汚染測定局のデータから作成した地上気温の詳細な分布図(図 12)を見ると、新木場の北に低温域がありその南には高温域が並んでいたことがわかる。同じく、大気汚染測定局データから、この低温域から北寄りの風と南寄りの風が収束しており、降水域と収束域がほぼ一致していることがわかる。

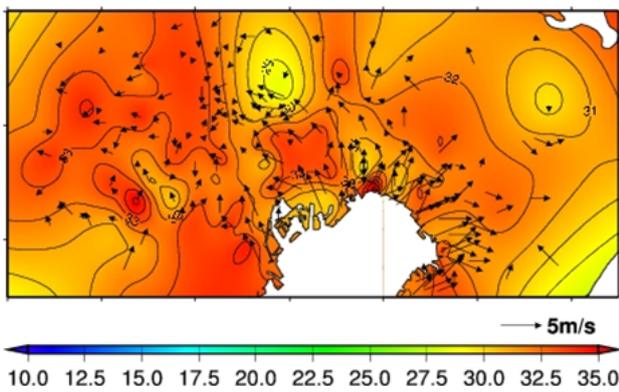


(a) AMeDAS Temperature and Wind
2004.08.10.12:00

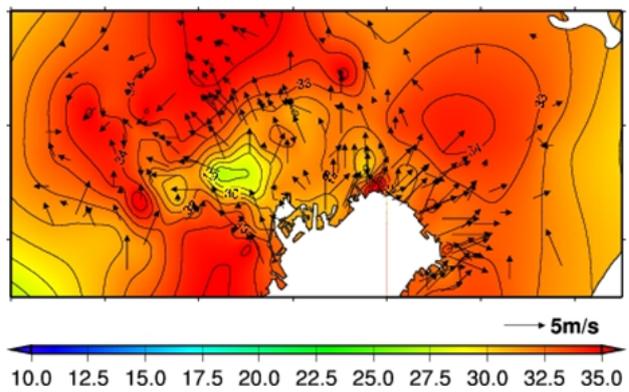


(b) AMeDAS Temperature and Wind
2004.08.10.13:00

図 11 図 4 と同じ。ただし、2004年8月10日の事例。(a)12時、(b)13時。



(a) 2004-08-10 12:00



(b) 2004-08-10 13:00

図 12 図 5 と同じ。ただし、2004年8月10日の事例。(a)12時、(b)13時。

5. まとめ

都市で豪雨が発生した2つの事例を対象に観測データの解析を行った。2つの事例には以下に記す共通した特徴が見られた。(1) 日本列島は太平洋高気圧に覆われるものの、上空には寒気を伴ったトラフが存在し、雷雨の起こりやすい状態にあった。(2) 降雨開始前、都心の気温はそのほかの地域に比べて高く、明瞭なヒートアイランドが認められた。(3) 降水が開始するまで都心で地上風が収束していた。

大規模な降水をもたらした2002年8月2日の事例と孤立した局地豪雨をもたらした2004年8月10日の事例の最も大きな違いは、前者の場合は、山岳域から大規模な降水帯が都心に移動してきたこと、この降水帯から流れ出す冷気外出流が豪雨発生数時間前からの地上風の収束域(都心部)に到達し、さらなる収束と不安定をもたらした点にある。このような降水系の合併により都心で強い降水をもたらされたと考えられる。都市のヒートアイランドの影響評価については今後の課題にしたい。

2004年8月10日13時前後に新宿付近で発生した豪雨を、アメダス観測網では捉えることができなかった。空間詳細な地上雨量計ネットワーク、レーダー観測の展開とそれらのさらなるデータ解析が望まれる。

謝辞

本研究の一部は、環境省の地球環境研究総合推進費(S-5-3)の支援を受けました。本研究の一部は、筑波大学と東京都環境科学研究所の共同研究の下に実施された。東京都水防災総合情報システム雨量データの利用にあたっては、東京都土木技術支援・人材育成センターの協力を得た。作図には可視化ソフトウェア GMT (The Generic Mapping Tools) を用いた。

参考文献

- (1) S. A. Changon Jr. ed., METROMEX: A review and summary. Meteor. Monogr., American Meteorological Society, 40 (1981), pp.181.
- (2) M. J. Shepherd, H. Pierce and A. J. Negri, Rainfall modification by major urban areas: Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite, J. Appl. Meteor., 41 (2002), pp.689-701.
- (3) J.-J. Baik, H. Kim and H. Y. Chun, Dry and moist convection forced by an urban heat island, J. Appl. Meteor., 40 (2001), pp.1462-1475.
- (4) C. W. Rozoff, R. Cotton and J. O. Adegoke, Simulation of St. Louis, Missouri, land use impacts on thunderstorms, J. Appl. Meteor., 42 (2003), pp.716-738.
- (5) 吉野正敏, 東京都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(1957), pp.121-125.
- (6) 藤部文昭, 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, 49 (1988), pp.759-767.

- (7) 佐藤尚毅・高橋正明, 首都圏における夏期の降水特性の経年変化, 天気, 47 (2000), pp.643-647.
- (8) F. Fujibe, H. Togawa, and M. Sakata, Long-term change and spatial anomaly of warm season afternoon precipitation in Tokyo, SOLA, 5 (2009), pp.17-20.
- (9) 藤部文昭・坂上公平・中鉢幸悦・山下浩史, 東京23区における夏季高温日午後の降水分布と地上風系, 天気, 50 (2002), pp.777-786.
- (10) 佐藤友徳・寺島司・井上忠雄・木村富士男, 東京都域における夏季の降水システムの強化, 天気, 53 (2006), pp.15-20.
- (11) 中西幹郎・原由起男, 東京都市部に短時間強雨をもたらした降水系の強雨強化にむすびつく局地風の特徴, 天気, 50 (2003), pp.91-103.
- (12) 三上岳彦・大和広明・安藤春夫・横山仁・山口隆子・市野美夏・秋山祐佳里・石井康一郎, 東京都内における夏季の局地的大雨に関する研究, 東京都環境科学研究所年報(2005), pp.33-42.
- (13) 澤田康徳・高橋日出男, 夏季の東京都心部における対流性降水の降水強度と気温場および地上風系場, 地理学評論, 80 (2007), pp.70-86.
- (14) 小林文明, ヒートアイランドが降水に及ぼす影響.-東京周辺における積乱雲の発達-, 天気, 52 (2004), pp.115-117.
- (15) 神田学・石田知礼・鹿島正彦・大石哲, 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 (2000), pp.7-15.
- (16) H. Seko, Y. Shoji and F. Fujibe, Evolution and airflow structure of a Kanto thunderstorm on 21 July 1999 (the Nerima heavy rainfall event), J. Meteor. Soc. Japan, 85 (2007), pp.455-477.
- (17) M. A. Matheson and Y. Ashie, The effect of changes of urban surfaces on rainfall phenomenon as determined by a non-hydrostatic mesoscale model, J. Meteor. Soc. Japan, 86 (2008), pp.733-751.
- (18) H. Kusaka, F. Kimura, K. Nawata, T. Hanyu and Y. Miya, The chink in the armor: Questioning the reliability of sensitivity experiments in determining urban effects on precipitation patterns. Proc. ICUC-7 (2009), (in CD-ROM).
- (19) 上杉忠考・田中恵信, 2000年7月4日に起きた東京都心における短時間強雨の発生機構, 天気, 55 (2008), pp.23-36.

(Received October 21, 2009, Accepted January 20, 2010)