

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	都市要因を考慮した夏季関東における都市型集中豪雨の多事例解析
Title(English)	CASE ANALYSES OF LOCALIZED HEAVY RAIN IN KANTO CONSIDERING URBAN PARAMETERS
著者(和文)	下重 亮, 仲吉 信人, 神田 学
Authors(English)	Ryo SHIMOJU, Makoto NAKAYOSHI, Manabu KANDA
出典(和文)	水工学論文集, Vol. 54, , pp. 349-354
Citation(English)	, Vol. 54, , pp. 349-354
発行日 / Pub. date	2010, 3

# 都市要因を考慮した夏季関東における 都市型集中豪雨の多事例解析

CASE ANALYSES OF LOCALIZED HEAVY RAIN IN KANTO  
CONSIDERING URBAN PARAMETERS

下重亮<sup>1</sup>・仲吉信人<sup>1</sup>・神田学<sup>2</sup>

Ryo SHIMOJU, Makoto NAKAYOSHI, Manabu KANDA

<sup>1</sup>学生会員 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1 石川台4号館)

<sup>2</sup>正会員 工博 東京工業大学准教授 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1)

To evaluate the effect of urbanization on localized heavy rain in Tokyo, a total of 9 localized heavy rain events were investigated numerically. The cutting edge of urban parameterizations, including urban canopy model, anthropogenic heat and vapor emission, and urban displacement height, were implemented into the WRF. The simulation results were compared with those without urban parameterizations. The urbanization apparently increased rainfall for five of nine events, while no effect was detected or no rainfall was simulated in the other 4 cases. The pattern of urbanized effect was phenomenally classified into 3 cases. Urbanization is not only enhancing rainfall locally at sea breeze front, but also blocking extended sea breeze penetration into inland thereby accumulating heat and moisture near the city center. The stagnant moisture and heat cause localized heavy rain in the next day.

**Key Words** : heavy rain, WRF, urbanization, Tokyo, sea breeze, heat island

## 1. はじめに

夏季に東京で頻発する局地的集中豪雨は、死亡事故を引き起こしてメディアに頻繁に取り上げられるなど社会的関心を集めており、防災上の観点からもこの現象のメカニズムの解明は急務になっている。都市が降水に及ぼす影響は、1980年代のアメリカの大型プロジェクトであるMETROMEXを始め、数多く研究が為されている(例えば、国内外の都市気象研究の進展の最新のReviewとしてKanda<sup>1)</sup>を参照されたい)。METROMEXおよびその後の多くの観測研究では、都市の風下域での有意な降水増加を指摘している。一方、総観場影響や地球温暖化影響など、時空間的に都市よりも大きなスケールの影響も指摘されている(例えばKanae et al.<sup>2)</sup>)。従って「都市が降水を助長するか」ということについては、都市以外の影響との分離が難しく、最終的な合意が得られていない古くて難しい都市気象学的命題の一つとして残されている。

社会的関心の高さから、東京圏の局所的集中豪雨と都市影響を論じた研究も多い。藤部<sup>3)</sup>はAMeDAS資料の解析より、東京都心部で降水量・頻度共に増加していること

を示し、ヒートアイランドの影響を示唆している。高橋<sup>4)</sup>は詳細な地上観測降雨データから首都圏の風下側において降雨頻度が增大しているというMETROMEXと同様の結果を報告している。数値モデルでも都市影響による降水増加等の気象変化を指摘する研究がいくつかあるが、(例えば妹尾ほか<sup>5)</sup>や Matheson et al.<sup>6)</sup>) 解析事例が少なかったり、都市パラメタリゼーションが旧世代型(人工排熱データかキャノピーモデルのどちらか、あるいは両方の欠如)と不確定な点が残されている。都市の対流性降水の数値計算はカオス性やモデル依存性が高く、従来行われてきた特定事例に対する感度実験の有効性を疑問視する主張もある(日下<sup>7)</sup>)。日下<sup>7)</sup>はそのような問題点を克服するため、2001年~2008年の夏期(8月)、「都市あり」と「都市なし」の感度実験を8ヶ月分を行い、都市影響による降水増加の有意性を指摘している。ただしこの長期感度分析は、台風等の総観場降水も全て含んでいる。

本研究の目的は、様々な降水のうち、夏期の午後首都圏において観測される「局地的集中豪雨」のみに着目し、それに対する都市影響の有無と物理的メカニズムを最新の都市気象数値モデルを用いて検討することである。それ以外の降水(台風など)への影響については論じない。

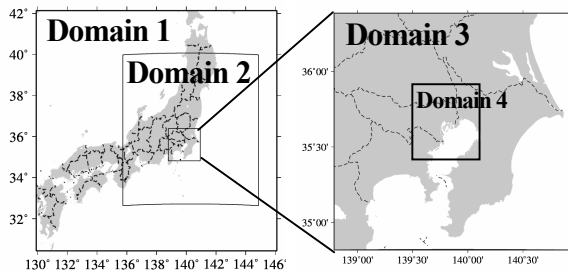


図-1 計算領域

表-1 各領域におけるグリッド情報

Domain	格子数	格子サイズ
Domain1	62×56×58	30 km
Domain2	171×171×58	6 km
Domain3	201×181×58	1.2km
Domain4	221×241×58	0.3km

表-2 物理モデル

Physics Settings	
Microphysics	WSM6 scheme
Longwave Radiation	Rapid radiative transfer model
Shortwave Radiation	Dudhia Scheme
Land Surface	Noah Land Surface Scheme
PBL scheme	YSU Scheme
Cumulus Parameterization	Kain-Fritsch Scheme

※ Domain 1,2,3ではCumulus Parameterizationは用いていない

本研究の特徴として以下の点が挙げられる。

- (1) 2007年から2008年の夏期に起こった都市型集中豪雨のみを全て抽出し、都市あり・なしの感度実験を行う。
- (2) 都市キャノピーモデル(以下UCMと呼ぶ)の導入 (Kusaka et al.<sup>8)</sup>), 時空間的に詳細な人口排熱・水蒸気の導入 (妹尾他<sup>5)</sup>), 詳細な都市幾何形状と修正粗度面の導入 (下重他<sup>9)</sup>)という、現在の都市気象モデルにおける最新のパラメタリゼーションを考慮する。
- (3) 都市型集中豪雨の再現計算は極めて難しいことは周知であり、実況再現の精度のみに拘ると進展が難しい。そこで、実況との比較はするものの、その再現性に固執せず、感度分析結果からあり得る都市影響の物理的メカニズムを抽出・整理し、議論することに重きを置く。

## 2. シミュレーションの概要

### (1) モデルの設定・計算条件

今回の研究では米国国立大気研究センター等が中心となって開発を行っているメソ気象モデルであるWRFを使用した。計算領域を図-1に、各領域におけるグリッド情報を表-1に、使用した物理モデルを表-2に示した。初期条件・境界条件にはNCEPのGlobal Final Analysesデータ(空間解像度1度×1度, 時間解像度6時間), 標高データとして国土交通省刊行の国土数値情報50 mメッシュ, 土

表-3 抽出された都市型集中豪雨日と分類された5パターン

都市が降水を助長していた日
(1) 広域メソ影響 (3ケース) 2007年7月29日, 2008年8月16日, 2008年8月21日
(2) 海風前線影響 (1ケース) 2008年7月29日
(3) 広域・局所混合型影響(1ケース) 2008年8月4日
(4) 都市影響が認められない日 2008年8月5日, 2008年9月7日
(5) 降水が再現されなかった日 2007年8月28日 2008年9月6日

地利用情報として同じく国土数値情報100 mメッシュを用いた。「都市あり」と「都市なし」の2条件を設定し、「都市あり」にのみ Kusaka et al.<sup>8)</sup>のUCMモデル, 妹尾他<sup>5)</sup>による人工排熱・水蒸気, 下重他<sup>9)</sup>による非一様な都市幾何形状を導入した。それ以外については、同条件で実験を行った。尚、計算の初期時刻は解析対象日の前日9:00とした。

### (2) 解析対象日

解析対象日の抽出方法として藤部ほか<sup>3)</sup>の方法を用い、東京23区で 1)最高気温が30 度を超えた日, 2)12時から21時の間に降雨開始, 3)24時以前に降雨終了, 4)一時間雨量が20 mm以上, という条件を満たす日を, AMeDAS気温データと雨量データを用いて抽出した。抽出した期間は2007年と2008年の7月～9月である。更に抽出された日から天気図と衛星画像を用いて、低気圧や台風などの総観場擾乱による降水と思われる日を除外した。2008年8月5日は厳密には抽出条件を満たさないが、死亡事故を引き起こし、社会的関心を集めた日であった為、例外的に解析対象日とした。このようにして全9日間を抽出し、その全ての日に対して感度実験を行った。抽出された都市型集中豪雨日を表-3に示した。

## 3. 結果

本研究においては、観測結果と如何に整合性があるかという実況の再現性よりも、むしろ「都市あり」「都市なし」の計算結果にどのような差異が現れるか、降水への都市影響としてどのような物理的メカニズムが存在するのかを整理・分類・検討することに着眼を置いた。その結果を表-3にまとめた。この分類は定量的指標を使用せずに、以下に述べるような、降水の時空間分布を詳細に追うことによって主観的に判断した。9事例のうち、2

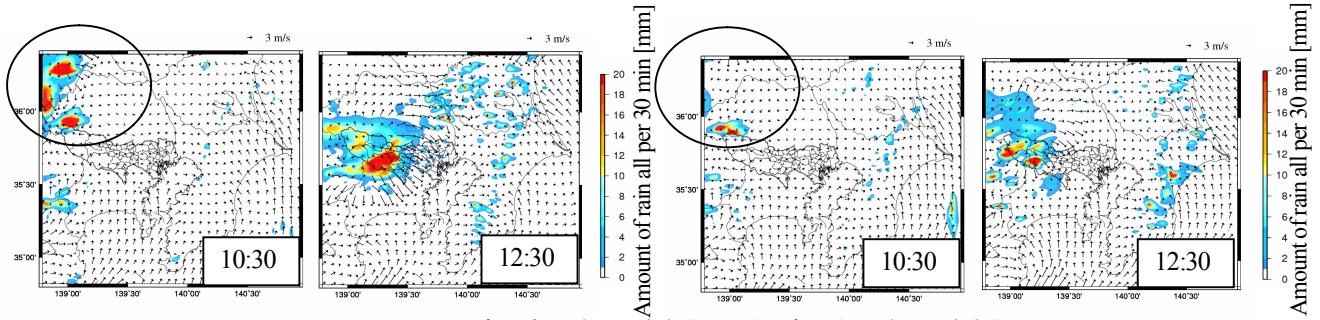


図-2 左：都市あり前30分降水量 右：都市なし前30分降水量

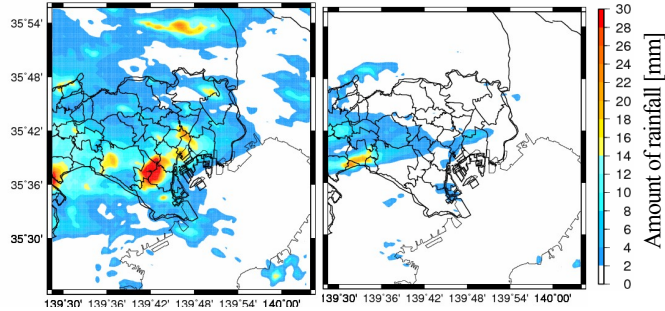


図-3 9:00～14:00 積算降水量(左：都市あり 右：都市なし)

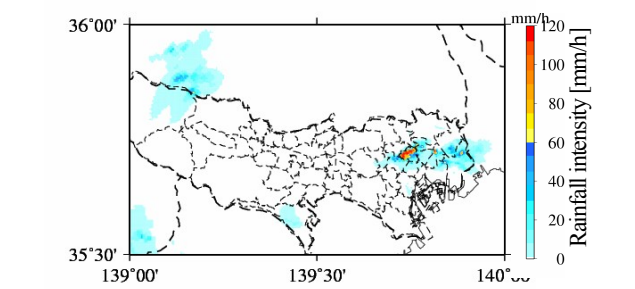


図-4 アメッシュによる14:16における降雨強度観測データ

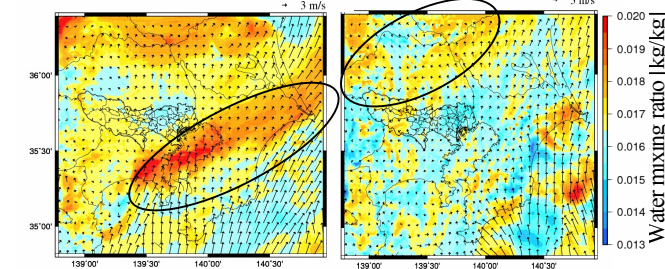


図-5 8月16日における都市ありと都市なしの地上2m混合比の差異(左：午前0時 右：午前8時)  
ベクトルは同時刻における都市ありの風向風速を示

事例は集中豪雨が再現されなかった。7事例は集中豪雨が再現され、そのうち5事例は都市が降水を助長されていると認められ、残りの2事例は明瞭な差異が見いだされなかった。都市が降水を助長すると認められた5ケースを、さらにそのメカニズムの違いによって3分類した。

1つは「(1) 広域メソ影響」と称する。都市影響が単なる局所的・局時間的に首都圏に留まらず、前日夜間の水蒸気や熱の山岳部への移動が翌日の首都圏での降水に影響を与えている。空間的には山岳域を含む広域関東圏に、時間的には前日の降水影響など履歴の蓄積が見られる点の特徴である。もう1つは、「(2) 海風前線影響」と称する。降水日における、海風前線とヒートアイランドの相互作用により海風前線上に積乱雲が発達するケースであり、影響は局所的・局時間的である。3つ目は「(3) 広域・局所混合型影響」と称する。(1)(2)の二つの影響が合わさって激しい雨をもたらす。それぞれの事例の解析結果を次節に示す。

(1) 「広域メソ影響」の事例 —— 夜間の水蒸気・熱の内陸部への輸送が翌日の都心部付近における局地的豪雨に影響を与える (2008年8月16日を例に)

この日の10:30と12:30における「都市あり」と「都市なし」で解析された関東地方の前30分間降水量を図-2に示した。両者とも10:30に埼玉県西部から群馬県西部にかけて降水が解析されている(図-2 黒丸部)。「都市あり」では、積乱雲が発達し、その外出流による一般風との収束が12:30に東京都区部で降水をもたらしている。一方で「都市なし」では積乱雲はその後あまり発達することなく、「都市あり」と同様に外出流がこの後東京都区部を通過したものの、降水は内陸のほぼ山岳域中心に留まっている。実際、この日の9時から両者共外出流が東京を通過し終える14時までには解析された降水量を積算すると、「都市あり」でのみ都区部の降水量が際立って多い(図-3)。東京都下水道局が観測しているレーダー雨量データ、アメッシュによって観測されたこの日の14:16における、東京近郊の降雨強度の様子を図-4に示した。時間はやや異なっているものの、計算結果と同様に埼玉の西部と東京都区部において降水が観測されており、これらの地域の不安定な大気場が再現されていた。

「都市あり」でより関東内陸部で積乱雲が発達した原因として、大気下層への水蒸気の供給が理由の一つにあげられる。8月16日午前0時と午前8時の時点での「都市あり」と「都市なし」実験の関東地方における地上2m混合比の差を図-5に示した。午前0時において東京湾一帯から千葉県にかけて帯状に北東から南西方向に湿った空気が存在しており(図-5左黒楕円部)、北関東にも同様に湿った空気が存在している。東京湾付近の湿った空気は、午前6時くらいまでほぼ同じところに滞留を続けた(図省略)。その後、日の出の時間と共に内陸に向かって吹く谷風がこの帯状に伸びている湿った空気を内陸に輸送し、午前8時には埼玉の北部まで帯状の湿った空気を運んだ(図5-右黒楕円部)。「都市あり」でのみ発達した内陸部

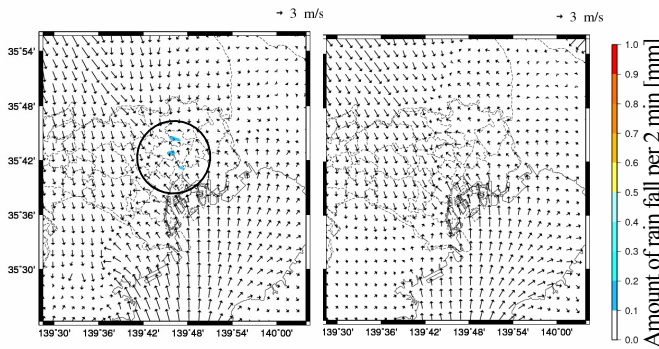


図-6 11:14 前2分降水量 左:都市あり 右:都市なし

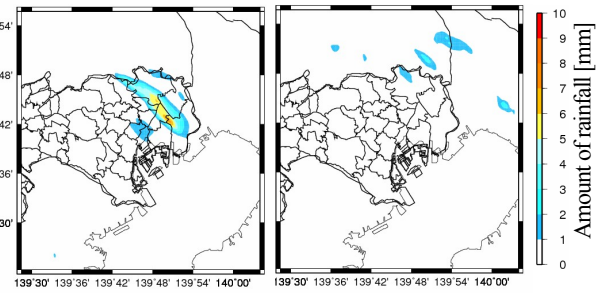


図-7 11:00~12:30 積算降水量  
(左:都市あり 右:都市なし)

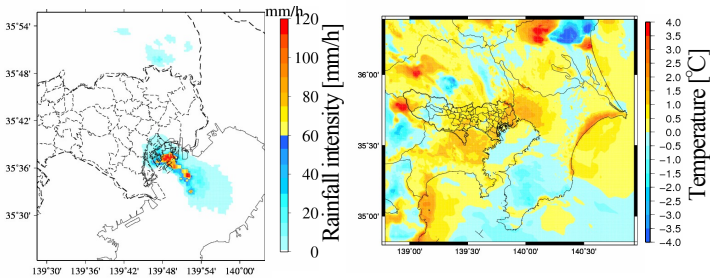


図-8 アメッシュによる12:30 における降雨強度データ  
図-9 都市ありと都市なしの 9:00における地上2m気温差

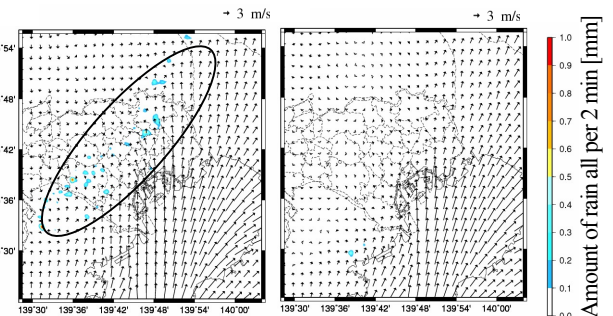


図-10 10:32における前2分間降水量  
(左:都市あり 右:都市なし)

の積乱雲は、元々内陸部に存在していた湿った空気と水蒸気を多量に含んだ谷風の影響が一因となり、発生した。

ここでは割愛するが、本ケースに分類された残りの2事例も夜間からの水蒸気や熱の移動が翌日の東京近郊における局地的集中豪雨に繋がっていた。本ケースの結果は、午前中に内陸部で発生する積乱雲の発生・発達には都市部での午後における局地的集中豪雨へと繋がり、そしてその内陸部で発生する積乱雲は夜間から早朝にかけての熱や水蒸気の、谷風や一般風による内陸部への輸送が重要な役割を担っている事を示唆している。尚、この事例において、「都市あり」でのみ、夜間に東京近郊で混合比が高い理由については前日の気象場が大きく影響していた。この影響については4章で議論する。

## (2) 「海風前線影響」の事例 —— 海風前線上に積乱雲が発達 (2008年7月29日の事例)

次に、「都市あり」のみ海風前線に沿って積乱雲が発生し、孤立的に都市域に降水がもたらされた2008年7月29日の事例を紹介する。図-6に計算された東京23区周辺の11:14における前2分間降水量を示した。共に海風が東京都心にまで侵入しているが、「都市あり」でのみ文京区周辺に降水が解析された(図-6左黒丸部)。その後その降水は徐々に強さを増すと共に、同じ地点で積乱雲が発生し続けた(図省略)。実際に11時から12時半までの積算降水量を計算すると、最大8mm程度ではあるが、「都市あり」にのみ、東京北東部に帯状に伸びる降水量が多い地域がある(図-7)。この時のアメッシュによって観測された

東京23区部周辺の降水強度を図-8に示した。少し降雨の場所が異なっているものの、計算結果と同様に北西から南東方向に向かって帯状の降雨域が東京湾へと伸びている。

降水が始まる2時間前である午前9時の「都市あり」と「都市なし」の気温差を図-9に示した。海風進入前、東京都心部周辺は「都市なし」に比べて郊外より2度程度気温が高く、ヒートアイランドを形成していた。都市の有無によって海風前線の様相が大きく異なる可能性は二次元の静力学モデルによってYoshikado<sup>10)</sup>により指摘されており、海風前線を形成する上昇流が特に明瞭である事、海風自体の水平風速が大きい事が明らかにされている。本事例は、ヒートアイランドが海風侵入時に都市上空で孤立的な積乱雲を発生させる要素となっていることを裏付ける結果となった。

## (3) 「広域・局所混合型影響」の事例 —— 海風前線上に発生した積乱雲と内陸部で発生した積乱雲が影響を及ぼし強い降水を引き起こす (2008年8月4日を例に)

次に海風前線上に発生した積乱雲に、内陸部で発生した積乱雲が影響して都区部に強い降水をもたらした2008年8月4日の事例について紹介する。この日の10:32における都区部周辺における前2分間降水を図-10に示した。「都市あり」では海風前線上に北東方向から南西方向に伸びる降水帯が解析された(図-10左 黒丸部)。一方、「都市なし」でも海風が東京都区部に侵入しているものの、降水は解析されていない。降水が始まる約一時間半前の午前

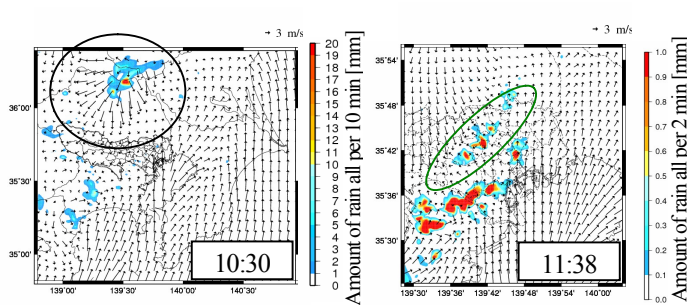


図-10 都市あり前10分間降水量 図-11 都市あり前2分間降水量

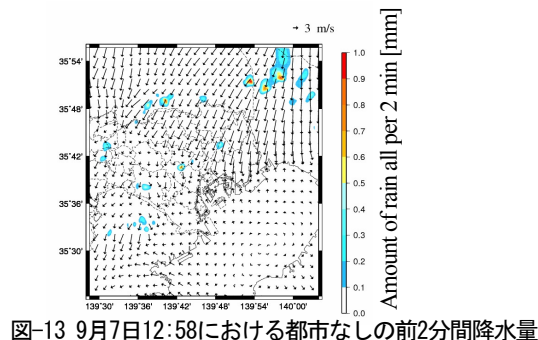


図-13 9月7日12:58における都市なしの前2分間降水量

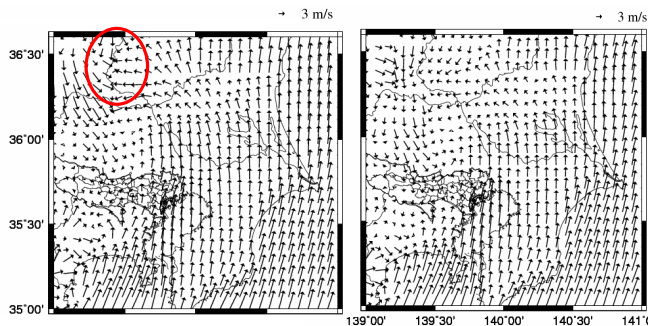


図-12 風系場 5:00 左：都市あり 右：都市なし

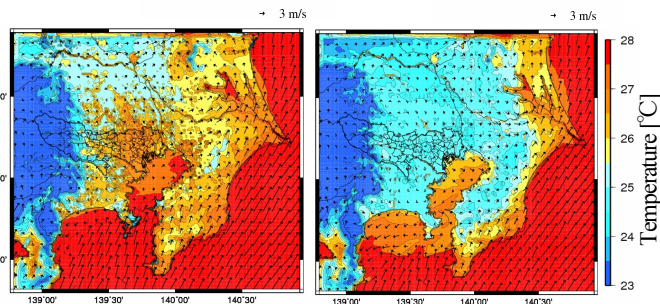


図-14 8月16日午前0時における地上2m気温  
(左：都市あり 右：都市なし)

9時の「都市あり」と「都市なし」の気温差を取ると、都心部を中心に2~3度気温が高く、ヒートアイランドを形成していた(図省略)。前例と同様に、「都市あり」でのみ海風侵入時に都市部で降水が解析されており、都市があることによって海風侵入時に雨が降りやすくなることが示唆されている。

海風前線上で発生した積乱雲とそれに伴う外出流は、その後埼玉県北部で発生した別の積乱雲(図-10 黒丸部)から生じた外出流と合わさり、23区北部で収束域を作り、11時半前後に強い降水をもたらした(図-11 緑丸部)。一方で「都市なし」ではこの間、海風前線上と埼玉県北部のいずれでも降水は発生しなかった(図省略)。

10時前後に埼玉北部で解析された積乱雲は明け方に群馬県、栃木県の県境付近で発生したものだ。前日の計算結果を見ると、関東平野では「都市あり」「都市なし」共に晴れており(図省略)、日中は谷風と海風が一連となって山岳域に吹き込んでいる'広域海風'が吹いていた。積乱雲が発生する前の午前5時の風系場の計算結果を見ると(図-12)、「都市あり」でのみ、広域海風の残りが、群馬県で発生した降水からの外出流と収束域を形成していた(図12-左 赤丸部)。一方で、「都市なし」では明け方にかけて広域海風は徐々に弱まり、「都市あり」で見られたような収束域は形成せず、積乱雲も形成されなかった。本事例は前日典型的な晴天海風日だった場合の都市影響を的確に表現しており、都市の熱的影響等で夜間まで関東北部に残った広域海風が、不安定が顕在化しやすい関東地方北部の山間部で発生した積乱雲からの外出流等の一般風と収束域を形成し、午後に関東圏に集中豪雨をもたらす積乱雲を形成する事を示している。

#### (4) 都市影響が見られない事例

都市影響が見られなかった事例として2008年9月7日の事例を紹介する。首都圏で降水が始まった頃の12:58における「都市なし」の前2分間降水量の計算結果を図-13に示した。至る所で雨が降りだしており、この結果は「都市あり」も同様であった。大気場が特に不安定であるような日は、都市がなくてもわずかなきっかけで雨が降り出す為、都市影響が見られない、又は評価出来ないと考えられる。

#### 4. 議論

都市の影響によって関東に局地的集中豪雨をもたらす3パターンをシミュレーションによって再現出来た。2事例においては海風前線の侵入と共に、「都市あり」でのみ都市域で降水が解像され、海風前線の侵入と共に孤立的に東京域で発生する積乱雲の発生に都市の存在が大きく関係していた。

ここでは夜間の水蒸気・熱の内陸部への輸送が翌日の都心部付近における局地的豪雨に影響を与えた(1)の事例について議論する。(1)の事例において「都市あり」が「都市なし」に比べて深夜に内陸や東京湾付近で水蒸気量が多かった理由として、前日夜に発生した降水の影響が大きい。前日の19時頃~21時にかけて埼玉北部に降水が解析され、「都市あり」「都市なし」共にそれに伴う外出流が発生した。8月16日午前0時の関東地方における地上2m気温の計算結果を図-14に示した。「都市なし」が「都市あり」に比べてより積乱雲が発達した結果、外出流は

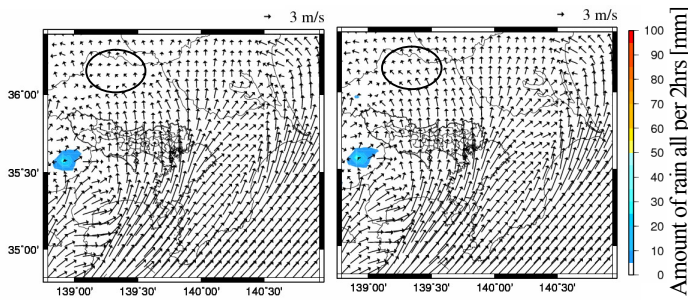


図-15 8月15日15時前2時間降水量・風系場  
左：都市あり 右：都市なし

ほぼ関東一帯を覆っているのに対し、「都市あり」は一部を覆うに留まっている。「都市なし」は降雨の影響で、関東全体の気温が低下しているのに対し、「都市あり」は降雨、外出流共に弱く、依然として都心部を中心としたヒートアイランド現象が見られる。その結果、「都市あり」でのみ、海風由来の湿った空気が暖められた状態で都市周辺と内陸部に滞留し続けた。朝方に山岳部に発生した積乱雲はそれらが日の出と共に発達する海風や谷風によって山岳地域に輸送された結果によって引き起こされた。

ここで着目すべきなのは、前日に発生した埼玉北部の積乱雲は「都市なし」でより発達したという事実である。これは、都市が海風の侵入を遅らせ、それにより内陸への水蒸気輸送と降水を抑制したためである。これを裏付けるため、この積乱雲が発達した、8月15日15時における前2時間降水量と風系場を図-15に示した。「都市あり」に比べて「都市なし」で、より内陸まで海風が侵入している(図-16黒丸部)。その後、「都市なし」「都市あり」共に群馬県の山岳域で発生した積乱雲に伴い外出流が発生したが、「都市なし」では内陸まで侵入した海風と外出流との間に強い収束域を形成し、埼玉北部で積乱雲を発達させたのに対し、「都市あり」では、海風の内陸への侵入が遅れた結果、外出流と顕著な収束域を形成することなく、降水は弱いものに留まった(図省略)。

(1)のパターンが見られた3事例の特徴として、前日に都市周辺で降水があった点が一致しており、また興味深いことに8月16日と全く同様のメカニズムで2007年7月29日の事例も前日に「都市なし」の方で都市周辺の降水が多かった。

内陸が不安定な場合、海風到達とそれによる熱・水蒸気輸送が、そこで多くの降水を引き起こすトリガーとなる。都市の存在は、海風の内陸部への侵入を遅らせ、内陸部の降水を抑制し、その分、水蒸気と熱を都市に滞留させる。その結果、翌日の内陸～首都圏における降水量を増している。首都圏における都市型集中豪雨の発生はそのような前日の降雨との関連性、すなわち、ある種の履歴性・周期性を持っていると考えられ、今後、都市の有無によってそれらにどのように影響を及ぼすのかをさらに事例を増やして検討する必要がある。

## 5. 結論

本研究の結論は以下の通りである。

- (1) 藤部(2002)の抽出条件により抽出された都市型豪雨日9事例に対して「都市あり」と「都市なし」の感度実験を行った。その結果、都市影響が見られなかった日と見られた日の2パターンに分けられた。
- (2) 違いが見られた日で、都市が降水に影響を及ぼしていると考えられる降水パターンとして広域メソ影響、海風前線影響、広域・局所混合型影響の3つのパターンに分類することが出来た。
- (3) 広域メソ影響が見られる日は都市の存在によって前日や夜間の海風の侵入の仕方が変化し、それが翌日の局地的な豪雨に繋がる様子が明らかになった。

## 参考文献

- 1) Kanda, M.: Progress in urban meteorology: A review, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **85B**, 363-383, 2007.
- 2) Kanae, S., T. Oki, A. Kashida: Changes in Hourly Heavy Precipitation at Tokyo from 1890 to 1999, *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 241-247, 2004.
- 3) 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, *天気*, **45**, 7-18, 1998.
- 4) 高橋日出男, 中村康子, 鈴木博人: 東京都心域における夏季の強雨頻度分布と高層建築物群との関係, *日本地球惑星科学連合2008年大会予稿集*, **X156-002**, 2008.
- 5) 妹尾康史, 神田学, 木内豪, 萩島理: 潜熱割合を考慮した人工排熱時空間分布の推計と都市局地気象に対する影響, *土木学会水工学論文集*, **48**, 169-174, 2004.
- 6) Mark A. Matheson, 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**, No. 5, 733-751, 2008.
- 7) 日下博幸, 縄田恵子, 羽入拓朗, 宮由可子, 木村富士男, : 都市が降水におよぼす影響 - 評価手法に関する現状と課題 -, *日本気象学会2009年度春季大会講演予稿集*, pp310
- 8) Kusaka, H. and F. Kimura : Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model : Impact on urban heat island simulation for an idealized case, *J. Meteor. Soc. Japan*, **vol.82**, pp.67-80, 2004.
- 9) 下重亮, 仲吉信人, 神田学: 都市の幾何形状と地形によって生じる海風の収束が東京の夏季局地的集中豪雨発生に及ぼす影響, *土木学会水工学論文集*, **53**, 277-282, 2009.
- 10) Yoshikado, H., 1992 : Numerical study of the daytime urban effect and its interaction with the sea breeze. *J. Appl. Meteor.*, **31**, 1146-1164, 1992.

(2009. 9. 30受付)