

# 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

THE IMPACT OF CONVERGENCE OF SEA BREEZE DRIVEN BY URBAN  
GEOMETRY AND TERRAIN ON LOCALIZED HEAVY RAIN IN TOKYO

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 high rise buildings in Tokyo Metropolis on the wind field which may trigger localized heavy rainfall in summer, the effect of the urban buildings was parameterized as the displacement height and installed to WRF as a new terrain height, i.e, the sum of the displacement height and the conventional terrain height. The new simulation-method resolved a convergence zone and strong upward flow around Nerima-ku, corresponding to the actual localized downpour on August 10th in 2004. The convergence region was the leeward side of Sinjuku sub city center. Without the consideration of the urban geometry, neither the convergence zone nor the strong upward flow were not calculated. These results imply high rise building in Sinjuku is one of the factors to break out localized heavy rain in Tokyo.

**Key Words :** heavy rain, terrain height, displacement height, sea breeze, WRF, Tokyo, urbanization

## 1. はじめに

都市型集中豪雨とも呼ばれている夏季の局地的な短時間強雨は死亡事故に繋がる事も多く、2008年8月5日には下水道工事中の作業員が5人死亡する事故も発生した。このような中、都市型集中豪雨についての社会的関心は年々高くなってきており、災害を未然に防ぐためにも発生メカニズムの解明は重要である。現在メカニズムの解明には大きく分けて統計的アプローチと気象モデルによるアプローチが行われている。統計的なアプローチによる研究では、短時間強雨の発生に先立ち、鹿島灘沿岸から吹く東よりの風と相模湾沿岸から吹く南よりの風が東京付近で収束する確率が高い事が明らかにされている(藤部ほか<sup>1)</sup>)。また最近では東京都心域の高層ビル群風下側において強雨頻度が増大していることが指摘されている(高橋ほか<sup>2)</sup>)。しかしこのような統計データに基づいた研究はAMeDASや自治体が点的に計測している風速風向・降水量データを基に行われており、数km程度の極めて狭い範囲に生じる短時間強雨の発生メカニズムを解明するのは時間的にも空間的にも難しい。気象モデル

による解析では都市キャノピーの熱収支特性を再現できるurban canopy model(UCM) (kusaka et al.<sup>3)</sup>)の導入により、都市気象の特徴は徐々に再現されるようになってきた。しかしUCMのみではモデルや初期値に対して都市の影響が小さいとされ、既存の気象モデルでは都市の存在が降水を増加させると完全には裏付けられているわけではなく(日下ほか<sup>4)</sup>)、降水を再現する事すら難しいのが現状である。一方で既存の気象モデルに都市の影響を反映させる別の試みとして人工排熱の導入がある。妹尾ほか<sup>5)</sup>は人工排熱を与えることで熱・水蒸気の局所的な収束が強められ、集中豪雨発生の要因の一つになっている可能性を指摘した。もう一つ都市を特徴付ける要素として高層建築物の存在も忘れてはならない。しかし都市の幾何形状を気象モデルに考慮させた計算は計算負荷の増大、コード構築の煩雑さからほとんど行われていない。高橋ほか<sup>2)</sup>は東京におけるゼロ面変位と地表面粗度から風速の対数則によって高度別の風速分布を仮定し、水平風速の発散量から簡易的に大気下層の上昇流を求めた結果、東風時には新宿付近で0.2 m/s程度の上昇流が存在すると指摘した。しかし都市の幾何形状の違いが水平方向の風の場に影響している事は明白であり、水平方向

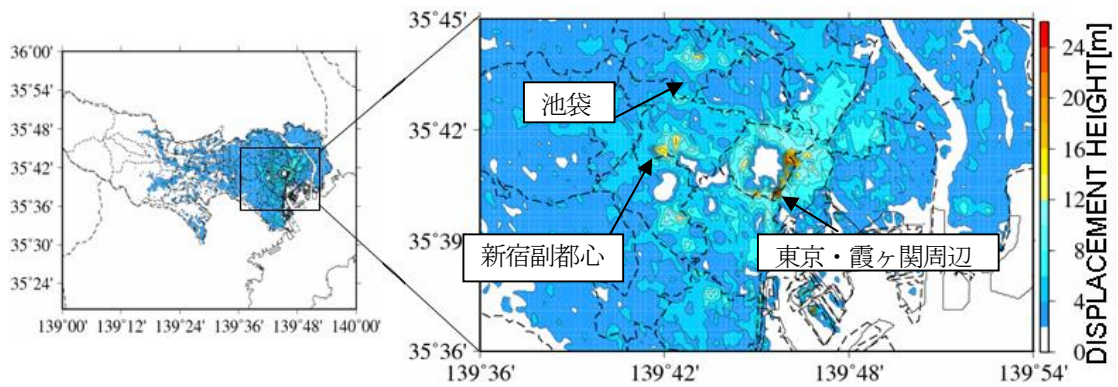


図-1 東京23区のゼロ面変位標高図

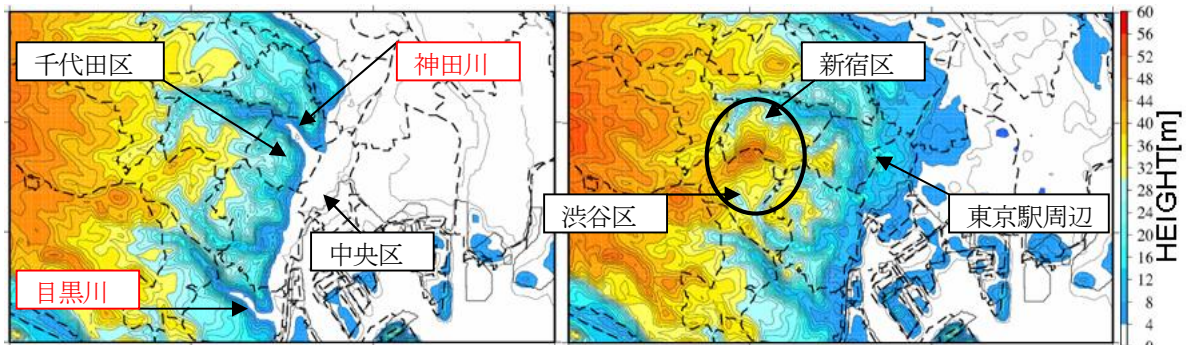


図-2 東京23区を中心とした標高図

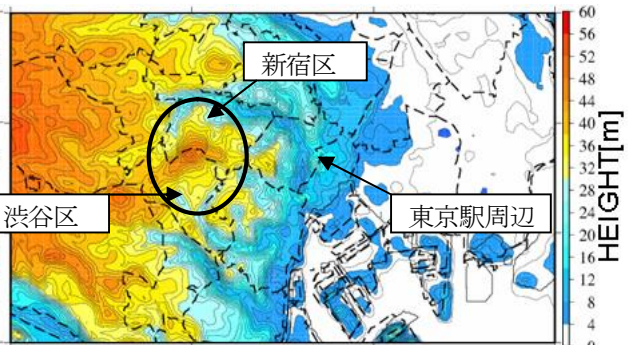


図-3 標高とゼロ面変位の合成図

の収束場から駆動される上昇流も評価する必要がある。そこで本研究では計算負荷の増大、複雑なコード構築の必要無しに都市建物群の影響を気象モデルに反映させる方法を考案し、その有用性を確かめた。その方法とは東京都のGISデータを基にゼロ面変位を算出して標高データと足し合わせ、新標高データとしてWRFに導入するものである。

メソ気象モデルにおいては計算コストや数値不安定性から数km程度の空間解像度で行われている研究が多い中、本研究では空間解像度を300 mまで高めて計算した。高空間解像度のシミュレーションにより、詳細な気象場の再現が可能になると同時に、高層ビル群が都市型集中豪雨の発生に対してどのように影響を与えているか評価する事を可能にした。

## 2. 東京におけるゼロ面変位と地形

### (1) ゼロ面変位の算出方法

ゼロ面変位の算出には、東京都都市計画局が作成した平成8,9年度の東京都のGISデータを用いた。このデータベースには建物ごとに建物床面積、階数、用途が記録されているが、建物の高さに関するデータは含まれていない為、妹尾<sup>6)</sup>と同様に、建物用途ごとに階高さを仮定し、階数を乗じることで建物高さを算出し、それらのパラメータの平均を取ることでメッシュ化した。空間解像度は緯度・経度方向共に1°/360である。メッシュ化したそれらのデータからゼロ面変位を求める為、

MacDonald<sup>7)</sup>が提唱した(1)式を用いた。

$$d = H(1 + 4.43^{-\lambda_p} (\lambda_p - 1)) \quad (1)$$

ここで  $d$  はゼロ面変位(m)、 $H$  が平均建物高さ(m)、 $\lambda_p$  は建蔽率である。

### (2) 東京都区部のゼロ面変位の特徴

図-1にゼロ面変位の標高図を示した。皇居東側に位置する東京駅周辺が最も高く、約26 mであった。また、皇居を取り囲むように分布している銀座・霞ヶ関も20 m程度の高さがある。これらの地域は建蔽率が高い為ゼロ面変位が高くなったと推察される。一方で23区西部では新宿区・渋谷区の区境付近に新宿副都心の高層ビル群によると思われる12 m以上の領域が存在し、同様に23区北部の豊島区池袋周辺にも12 m以上の高い領域が算出された。またそれ以外の23区の地域でも概ね4 m以上の高さが算出された。

### (3) 東京都区部の地形とゼロ面変位との合成

(1)の方法で求めたゼロ面変位と、東京の標高データ(図-2)を合成した図を23区を中心に図-3に示した。領域は図-1と同じである。元々の標高データは、国土数値情報100メートルメッシュ標高データを用いた。尚、ゼロ面変位の解像度を標高データと合わせるために、ゼロ面変位のデータを曲率最小化アルゴリズムを基に補間した。図-2より、東京における標高は23区東部において低く、ゼロ面変位が高かった中央区や千代田区の一部も0mに

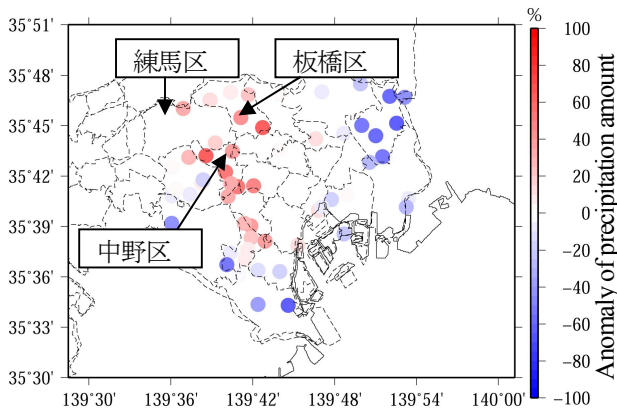


図-4 都市型集中豪雨日における積算降水量の偏差

近い。23区中央部から西部に向かって緩やかな傾斜になっており、府中市等の市部と23区東部との標高差は60 m程度になっている。一方で新宿区・渋谷区を取り囲むように流れる神田川、目黒川の影響で、川に囲まれた両区は島のような等高線を描いている。ゼロ面変位を足し合わせると(図-3)、新宿区・渋谷区付近の島のような形状は更に明確になり(図-3黒丸部)、また池袋周辺もゼロ面変位を考慮しない場合に比べて高くなっている。一方でゼロ面変位が高かった東京駅周辺では元々の標高の低さに相殺されて標高とゼロ面変位の合成値はそれほど高くない事が分かる。

### 3. 統計解析

気象モデルを用いて解析する日を選ぶに当たって、まず過去の都市型集中豪雨が発生した日を抽出した。抽出条件として藤部ほか<sup>1)</sup>が用いた方法と同様に東京23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、という条件を用いた。藤部ほか<sup>1)</sup>はAMeDASの雨量データを用いた抽出を行ったが、本研究ではAMeDASでは捕えられない局地的な降雨イベントも抽出するために23区内68箇所で観測されている東京都建設局河川部の雨量データを用いた。解析した期間は2000年から2005年の7~9月である。関東付近に低気圧や台風などの総観場擾乱の影響があると思われる日は注意深く除いている。次に集中豪雨時の空間的特徴を見るため、抽出された日の12時~21時の雨量を地点ごとに積算し、平均降水量からの地点ごとの空間偏差を求めた(図-4)。欠測等が多く、結果に影響を及ぼす恐れがある地点はあらかじめ除外している。その結果、中野区・板橋区・練馬区では30%以上他区部より降水量が多い傾向が見られた。これらの区は、日中東京湾から進入してくる海風の風下地域であり、新宿副都心の後ろ側に位置する。この結果は高橋ほか<sup>2)</sup>が示した都市型集中豪雨の発現頻度分布の結果と概ね整合し、新宿周辺で積乱雲の発達を助長する

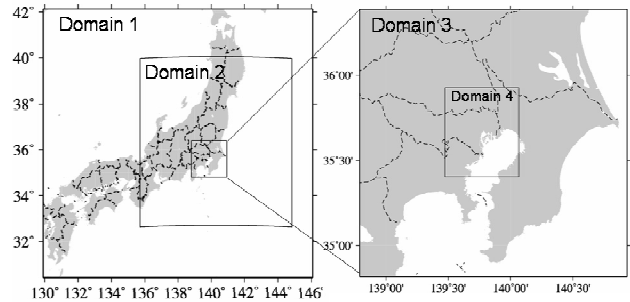


図-5 計算領域

表-1 各領域におけるグリッド情報

Domain	格子数	格子サイズ	Time step
Domain1	62×56×58	30 km	80s
Domain2	171×171×58	6 km	20s
Domain3	201×181×58	1.2km	4s
Domain4	221×241×58	0.3km	1.3s

表-2 物理モデル

Physics Settings	
Microphysics	Thompson graupel scheme
Longwave Radiation	Rapid radiative transfer model
Shortwave Radiation	Dudhia Scheme
Land Surface	Noah Land Surface Scheme
PBL scheme	Mellor-Yamada-Janjic TKE Scheme
Cumulus Parameterization	Kain-Fritsch Scheme

※ Domain3とDomain4ではCumulus Parameterizationは用いていない

※ 他の物理モデルに関してはWRFデフォルトの設定を用いた

何らかの要因が存在する可能性を示唆している。

### 4. 数値シミュレーション

#### (1) シミュレーションの概要

都市型集中豪雨に対してゼロ面変位がどの程度大気に影響を与えているかを評価する為に、米国国立大気研究センター(NCAR)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にゼロ面変位を合成した標高データを組み込み、実際に都市型集中豪雨が起こった日を4重ネスティングによってシミュレーションした。計算領域を図-5に、各領域におけるグリッド情報を表-1に、用いた物理モデルを表-2に示す。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メッシュデータ、土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。本研究ではゼロ面変位の有無による感度を比較するために、ゼロ面変位と元の標高を足し合わせたケース(RUN1)とゼロ面変位を考慮しないケース(RUN2)の2ケースを設定した。両ケースともWRFにオンラインで導入されているkusaka et al.<sup>3)</sup>のUCMモデルを用いた他、妹尾ほか<sup>3)</sup>の

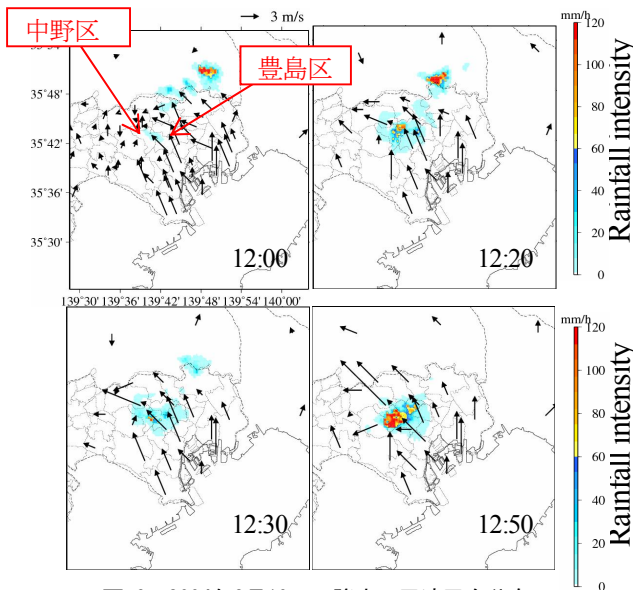


図-6 2004年8月10日の降水・風速風向分布

人工排熱データセットを用いている。尚、粗度長については地表面から（ゼロ面変位を考慮した高さ）0.5mとして一様に与えている。解析対象日として2004年8月10日を選んだ。この日は昼頃に中野区周辺に局地的な降水があり、新宿ビル群が降水を強化させるかを調べるのに適している。尚、助走時間を取るために、数値計算の初期時刻は2004年8月8日午前3時(JST)とした。

## (2) 2004年8月10日局地的強雨発生時の環境場

この日の天気図と館野で午前9時に観測された高層気象観測のデータを基にしたエマグラム(図省略)では、北陸から東北に伸びる寒冷前線と日本の南海上に発達する台風によって、日本列島における大気の状態は不安定であった。関東地方においては太平洋高気圧に覆われているものの、エマグラムを見ると午前9時の段階でCAPEが271あり、大気はやや不安定な状態であったことが示唆される。また持ち上げ凝結高度(LCL)は約800 m (916 hpa)、自由対流高度は約3000 m (712 hpa)と、日射によってそれほど下層大気が熱せられていないこの時間にしては積雲・積乱雲が発生しやすい大気場であった。東京都下水道局が観測しているレーダー雨量データ・アメッシュと東京都内の気象観測網METROS20<sup>9)</sup>、東京都環境局の風速・風向データを用いてこの日の風向風速・降水を解析すると(図-6)、12時前から埼玉県南東部で強い降水が観測され始め、12時にはそこから南西方向へ帯状に降水域が伸び、東京都の一部でもごく弱い降水が観測されている。この時東京湾沿岸部から降水が観測されている地点までは南東から南よりの海風が吹いている反面、区部西部では風向や風速にはばらつきがあり海風の侵入は認められない。降水が観測されている地域は海風の先端部に位置しており、前線面に生じた上昇流が降水発生要因の

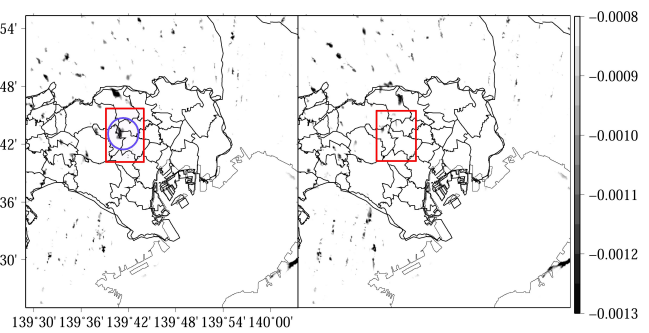


図-7 12時40～50分の収束の平均 左：RUN1 右：RUN2

一つとして寄与したと考えられる。その後12時20分にかけて豊島区・中野区の区境付近で一時的に降水が強まったが、12時30分には埼玉南東部も含めて降水が弱まり、そのまま降り止むかと思われた。しかしその後突如豊島区・中野区の区境付近で局所的に激しい雨が観測され、12時50分頃に降水強度はピークを迎えた。東京アメッシュでは12時40分から50分の10分間の間に中野区で20 mm近い降水量を観測している。この日の事例について小林ほか<sup>8)</sup>は、海風の侵入に先立って東京北部から埼玉南部にかけて局地的に高温化したことにより熱的低気圧が形成され、練馬区周辺に局地前線が形成されていた事が積乱雲形成の一因になっていたと指摘している。同様の指摘は三上<sup>9)</sup>によってもなされている。しかし最大降水量を記録した12時40分からの積乱雲の再強化に伴うと思われる降水の発生要因については触れられていない。本研究ではこの12時40分からの積乱雲の再強化のメカニズムに着目して解析を行った。

## (3) 結果と議論

まず積乱雲を再強化させ得る要因に着目する為、シミュレーション結果から、中野区周辺で雨が強まった12時40分～50分間の地上10 mにおける平均収束を計算し、図-7に示した。収束の平均値を見ると、RUN1では中野区周辺で収束が強まっている様子が見えた(図-7左、青丸部)。一方、RUN2では同地域にそのような顕著な収束は見られなかった。尚、この時刻以前において、実況と解析結果における風系について、今後の議論に影響を与えるような目立った差異は見られていない。また、RUN1、RUN2共に12時40分～12時50分の間に海風がこの地域を通過しており、両者の間で総観場における風の場に大きな差異はない。

次にこの中野区周辺の領域(図-7左、赤四角部)に着目し、12時20分から50分にかけての風速風向分布について議論する。海風の侵入が見られない地域は地上10 m風速で概ね南西の風3 m/s以下であり、RUN1、RUN2の間で特に差異は見られなかった為、視認性も鑑みて風速3 m/s以下のベクトルは省略し、この領域の地上10 m風速

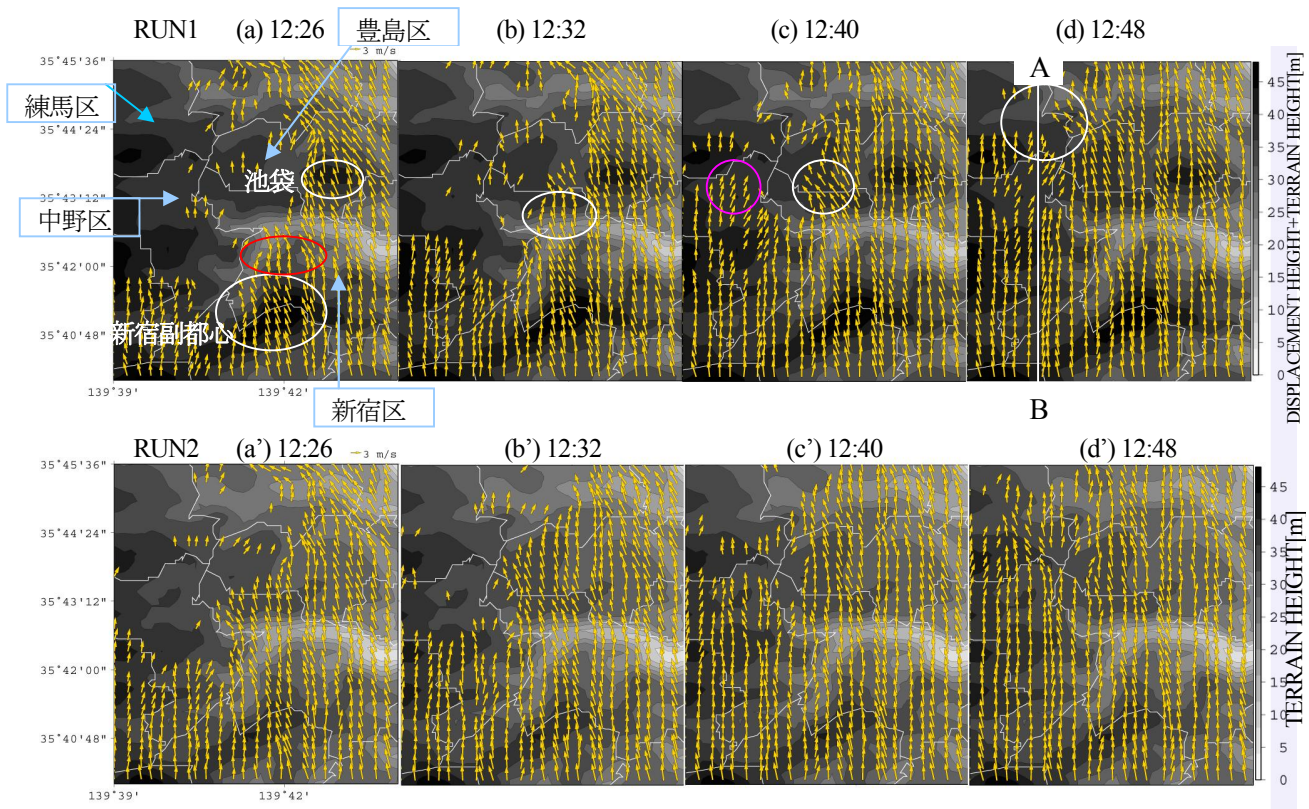


図-8 練馬・豊島・中野・新宿区を中心とした地上10mの風速ベクトル図 上:RUN1, 下:RUN2

ベクトル図を図-8に示した。

a) 12時26分の風系

RUN2において南から侵入した海風前線は新宿副都心を通り、新宿区北部まで達している(図-8-(a'))。一方で、RUN1(図-8-(a))では海風の侵入は若干遅れ、新宿副都心付近を通過中であり新宿区北部(図-8-(a)赤丸部)では南西の風と南東の風が収束している。

b) 12時32分の風系

図-8-(a)で見られた風の収束は一部構造を保ったまま豊島区・新宿区の区境付近に存在している(図-8-(b)白丸部)。RUN2では(図-8-(b'))海風前線はすでに豊島区を通過し、風向もほぼ南となっている。

c) 12時40分の風系

RUN1で見られた収束域の一部はより強化され強い南東風となって依然として区境付近に存在している(図-8-(c)白丸部)。一方この頃中野区にも南から海風前線が侵入しているが、中野区北東部では南西よりの風となっている(図-8-(c)桃色丸部)。同時刻RUN2では中野区北東部でもほぼ南風となっている。

d) 12時48分の風系

中野区の方から吹いてきた南西よりの海風(図-8-(c)桃色丸部)と区境付近に存在していた強い南東の海風(図-8-(c)白丸部)が練馬・板橋区境付近で合わさり強い収束域を形成している(図-8-(d)白丸部)。RUN2でも散発的に収束域は見られるが、図-7(右, 赤四角部)を見ても分かる通り、RUN1ほどの顕著な収束域ではない。

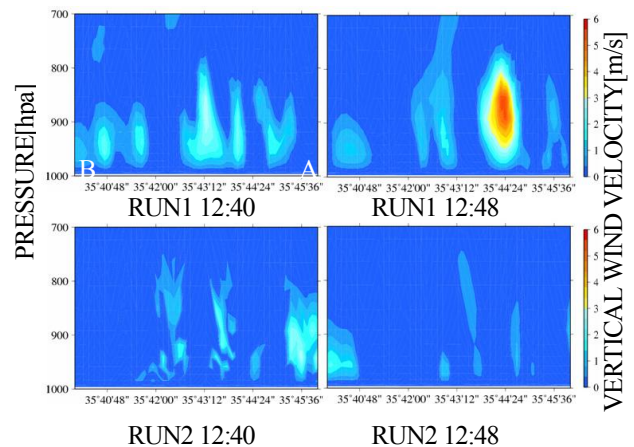


図-9 線分A-B(図-7-(g))に沿った鉛直断面における上昇流

e) 鉛直風速

図-9に12時40分、12時48分での線分A-Bに沿った鉛直上昇流の鉛直断面図を示した。12時40分の時点ではRUN1には中央部に中野区方面から侵入してきた海風前線面に伴う上昇流が見られ、RUN2にも弱いながら同様の特徴が見られる。RUN2には北部にも2 m/s程度の強い上昇流が解析されているが、これは先行して南東から侵入していた海風前線に伴うものと考えられる。その後、RUN1に見られた上昇流は海風が内陸へ侵入するに連れ、徐々に強まっていき、12時48分には豊島・練馬区境付近で850 hpa~900 hpa面に渡って秒速6 mを超える強烈な上昇流となった。一方でRUN2には強い上昇流は解像されておらず、新宿周辺における数十mのゼロ面変位の違い

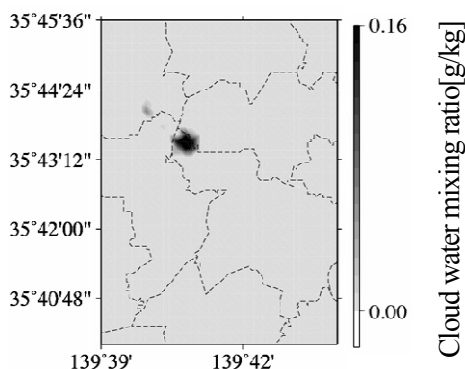


図-10 12時48分における雲水混合比鉛直積算値の差分 (RUN1-RUN2)

が鉛直風速に多大な影響を及ぼしていると考えられる。12時48分におけるRUN1とRUN2の雲水混合比鉛直積算値の差分を図-10に示した。領域は図-8と同じである。降水こそ再現できなかったが、ゼロ面変位を加味したことにより、実際の降水とほぼ対応した場所で雲水混合比が増加し、積雲が解像された(図省略)。雲水混合比の増加エリアは6 m/sを超える上昇流が発生した地域に対応し、これは都市幾何形状の違いが積雲発生に大きな役割を果たしている可能性を示唆している。降水の解像にまで至らなかった理由の一つとして大気安定度がうまく再現されていなかった事があげられ、原因としては用いた物理スキームの問題が考えられる。例えば現行のUCMは都市の力学パラメータを一様に与えているため、幾何パラメータの非空間一様性が強い東京のような領域で高解像度シミュレーションを行うには問題が生じると考えられる。無論、海風通過時の数分間のみの局地的な上昇流が大雨に至らせるような積乱雲を発生させるとは考えにくい。鹿島灘から進入してきた海風や今回の事例のように先行降水による外出流によって南から進入してきた海風が練馬区方向に抜けられずに停滞する時は今回示したメカニズムによって長時間練馬区南東部に上昇流が発生し続け、積乱雲を発達させるトリガーとなっている事は十分考えられる。

## 5. 結論

本研究の結論は以下の通りである。

- (1) 都市幾何形状を簡易的に気象モデルに反映させる方法を考案した。建蔽率と建物高さからゼロ面変位を算出し、地形データと重ねる方法である。ゼロ面変位は中央区付近で20 m以上あり最も高いが、地形を重ねると新宿副都心周辺の標高が目立って高かった。
- (2) 過去に都市型集中豪雨が起こった日の雨量データを統計的に調べてみると、中野区周辺の雨量が他地域に比べて突出して多かった。
- (3) 都市幾何形状を考慮した気象シミュレーションを行

うと、海風前線進入時、実際に降雨が増大した地域に対応して6 m/sを超える上昇流が発生した。

都市幾何形状をゼロ面変位としてWRFに組み込む事で、気象場がより実況に近づくように変化したことから、本手法の有用性が確かめられた。また都市型集中豪雨の発生機構解明に当たり、都市幾何形状の影響を考慮する必要性があるということが示唆された。

謝辞：東京アメッシュ並びにMETROSデータの利用にあたり、東京都下水道局施設管理部の大橋秀郎氏、横田雅仁氏、東京都環境科学研究所の安藤晴夫氏、横山仁氏には多大なご協力とご助言を頂いた。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 藤部文明, 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短時間強雨に先立つ地上風系の特徴, *天気*, Vol. 49, pp395-405, 2002.
- 2) 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.
- 3) Kusaka, H., kondo, H., Kikegawa, Y. and Fujio, K., : A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab model, *Boundary-Layer Meteorology.*, **101**,329-358, 2001.
- 4) 日下博幸, 羽入拓朗, 原政之, 木村富士男, 片岡久美, 足立幸徳: 地球温暖化時のヒートアイランド(猛暑)予測研究と都市降水シミュレーション研究の現状と課題, *日本気象学会2008年度春季大会講演予稿集*, pp310, 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, *水工学論文集*, 第48巻, 169-174, 2004.
- 6) 妹尾康史: 都市のエネルギー消費活動と幾何形状を考慮した都市気候シミュレーションモデルの構築, *東京工業大学理工学研究科国際開発工学専攻修士論文*, 2004.
- 7) Macdonald, R.W. Griffiths, R. F., and Hall, D. J.: An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays, *Atmos. Environ.*, Vol. 32, pp.1857-1864, 1998.
- 8) 小林文明, 菅原広史, 小川由佳, 神田学, 田村幸雄, 日比一喜, 宮下康一, 本條毅, 足立アホロ, 三上岳彦, 石井康一郎: 夏季晴天時東京都心における対流雲発生時の下層風系, 第19回 風工学シンポジウム論文集, pp. 43-48, 2006.
- 9) 三上岳彦, 大和広明, 安藤晴夫, 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期の局地的大雨に関する研究, *東京都環境科学研究所年報*, pp33-42, 2005.

(2008. 9. 30受付)