

# 2008 年に東京都雑司ヶ谷付近で発生した局地的 大雨へ都市加熱が与えた影響

THE EFFECT OF URBAN HEATING ON A LOCALIZED HEAVY RAINFALL  
NEAR ZOSHIGAYA IN TOKYO IN 2008

相馬 一義<sup>1</sup>・田中 賢治<sup>2</sup>・砂田 憲吾<sup>3</sup>・末次 忠司<sup>4</sup>・坪木 和久<sup>5</sup>・榊原 篤志<sup>6</sup>・茂木 耕作<sup>7</sup>

Kazuyoshi SOUMA, Kenji TANAKA, Kengo Sunada, Tadashi Suetsugi, Kazuhisa Tsuboki,  
Atsushi Sakakibara, Qoosaku Moteki

<sup>1</sup>正会員 博 (工) 山梨大学特任助教 大学院医学工学総合研究部 (〒 400-8511 甲府市武田 4-3-11)

<sup>2</sup>正会員 博 (工) 京都大学准教授 防災研究所水資源環境研究センター (〒 611 宇治市五ヶ庄)

<sup>3</sup>フェロー 工博 山梨大学教授 大学院医学工学総合研究部 (〒 400-8511 甲府市武田 4-3-11)

<sup>4</sup>正会員 博 (工) 山梨大学教授 大学院医学工学総合研究部 (〒 400-8511 甲府市武田 4-3-11)

<sup>5</sup>非会員 理博 名古屋大学准教授 地球水循環研究センター (〒 464-8601 名古屋市千種区不老町 F3-1)

<sup>6</sup>非会員 工修 (株) 中電シーティーアイ (〒 461-0005 名古屋市名古屋市中区東桜 1-3-10)

<sup>7</sup>非会員 博 (理) 海洋研究開発機構 地球環境変動領域 (〒 236-0001 横浜市金沢区昭和町 3173-25)

Recently, localized heavy rainfalls over heavily urbanized areas have caused severe damage in Japan. On 5 August 2008, a localized heavy rainfall caused a rapid increase in drainpipe discharge, which killed five people working in a drainpipe near Zoshigaya, Tokyo. This study investigated the effect of urban heating on this localized heavy rainfall by two ensemble experiments using a cloud-resolving model that included precise urban features. The first experiment (CTRL) considered realistic land cover, anthropogenic heat, and urban geometry. In the second experiment (WURB), to reduce only the urban heating and keep the urban geometry, the anthropogenic heat was ignored and the roofs, walls, and roads were covered by shallow water. The amount of rainfall was clearly reduced over Tokyo in the WURB experiment. The weaker surface heating in WURB reduced the near-surface air temperature and weakened the convergence of horizontal wind and updraft over the urban area, and resulted in the smaller amount of rainfall in WURB.

**Key Words :** *localized heavy rainfall, cloud-resolving model, urban environment, land-atmosphere interaction*

## 1. 序論

近年日本では、晴れた状態から積乱雲が急激に発生発達し非常に狭い地域で短時間に強い雨をもたらす、局地的大雨による被害が問題となっている。例えば 2008 年 8 月 5 日に東京都豊島区雑司ヶ谷付近で発生した局地的大雨では、30 分ほどの間に下水管の水位が急激に上昇し、作業中の 5 名が犠牲になる大きな被害が出ている。

このような降水の予報精度を向上させるために、データ同化により数値予報の初期値を向上させる試みが精力的に行われている<sup>1)</sup>。同時に、数値予報で使われる雲解像モデルにおける都市の表現の改善も行われつつある<sup>2),3)</sup>。

アメリカでは 1970 年代からセントルイスにおける観測プロジェクト (METROMEX) を始め多くの観測研究が行われ、ヒューストンなど海沿いの都市の風下側

における降水量増加が指摘されている<sup>4)</sup>。日本においても首都圏の雨量計および降水レーダー観測から、局地的大雨を含む夏季の対流性降水が都市域で強化される可能性が指摘されている<sup>5), 6)</sup>。

近年では数値モデルによる実験でも降水に与える都市の影響が指摘されつつあるが、都市をすべて草原に変えた数値実験を行うなど、都市の有無に焦点を当てた議論が多い<sup>7),8)</sup>。

都市が降水に与える影響には、熱輸送と運動量輸送による影響の両者がともに含まれている。数値モデルの適切な改良や都市計画による緩和策へつなげていくためには、運動量輸送への影響と熱輸送への影響を分けて評価し、都市環境を構成する個々の要素がどのように降水に影響するか明らかにしていく必要がある。

運動量輸送に影響を与える要素として、都市の幾何形状 (高層建物の存在等) が挙げられる。下重ら (2009)<sup>9)</sup> は都市の幾何形状によるゼロ面変位増加の導入によ

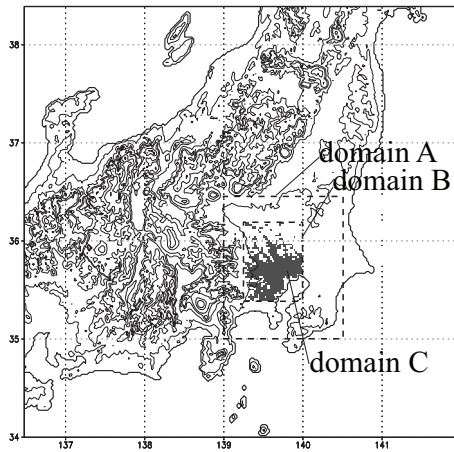


図-1 計算領域と解析対象領域。太い実線は標高 0m, 細かい実線は標高 100, 500, 800, 1000, 1500, 2000m をそれぞれ表す。解析領域 C は解析領域 B のうち 2km × 2km グリッド内で都市の面積割合が 30 % を超える領域である。

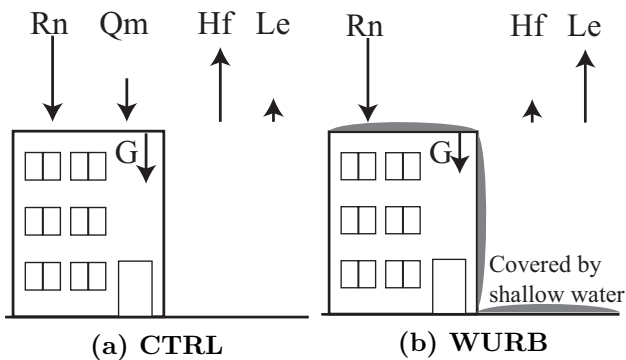


図-2 各実験における都市域での熱収支。

り、首都圏への海風侵入時の上昇流の再現精度向上が見られることを指摘している。

熱輸送に与える要素として、空調・自動車からの人工排熱とアスファルト等の人為的土地被覆が挙げられる。このうち特に後者については、単純に土地利用を変化させるだけでは運動量輸送への影響も同時に変わってしまうため、これまで人為的土地被覆と人工排熱を併せた都市加熱全体が降水に与える影響を抽出する試みはなされていなかった。しかし、人為的土地被覆により蒸発が抑制され、日射によるエネルギーの大部分が顕熱に配分されて加熱が強化されることは都市特有の環境形成に重要であり、それを含めた評価が必要である。

また数値計算のカオス性に対して都市の影響が埋もれてしまう可能性があるため、特定事例に対する単一の計算による都市の影響評価の有効性を疑問視する指摘もある<sup>3)</sup>。しかし X バンド MP レーダー等近年急速に向上している観測解析と数値モデルによる実験とを対応させて局地的大雨の知見を深めるためには、特定事例に対する都市の影響評価も依然として重要と考えられる。そのため、日下ら (2009)<sup>3)</sup> が挙げた解決案のうち初期値等を変えた複数の計算を行いアンサンブル平均をとって議論する方法が有効と考えられる。

以上を踏まえて本研究では、雲解像モデルを用いたアンサンブル実験により、特に大きな被害をもたらした 2008 年東京都豊島区雑司ヶ谷付近での局地的大雨に対する (人為的土地被覆と人工排熱を併せた) 都市加熱の影響を評価する。

## 2. 使用するモデルと数値実験の設定

### (1) 使用するモデル

本研究では、都市の幾何形状 (建物高さ分布) は変えず加熱のみを変えた数値実験を行うために、詳細な都市活動を考慮した雲解像モデル CReSiBUC<sup>(10),7)</sup> を用いる。CReSiBUC では大気モデルとして名古屋大学で開発された雲解像モデル CReSS<sup>(11)</sup> を、陸面過程モデルとして京都大学で開発された SiBUC<sup>(2)</sup> を用いている。

陸面過程モデル SiBUC は植生、水体、都市の各サブモデルから構成され、都市サブモデルでは空調・自動車等から排出される人工排熱量の分布、アスファルトなどの人為的土地被覆、都市幾何形状を考慮して地表面から大気への水・熱・運動量輸送を計算可能である。

都市サブモデルでは屋根面・壁面・路面に水たまりの存在を許している。水たまりについて熱収支は解かず、付着する各面の温度に等しいと仮定し、蒸発による潜熱は各面の熱収支を解く際に考慮される。

### (2) 使用するデータと計算条件

土地利用及び植生データには国土地理院による国土数値情報 (KS-202) を、人工排熱量 (顕熱) については妹尾ら (2004)<sup>(12)</sup> の推定値を用い、建物階数分布については東京都 GIS に基づいて与える。妹尾ら (2004)<sup>(12)</sup> は建物用途・自動車車種等による排熱量原単位に延べ床面積・交通量等の分布を掛け合わせ、人工顕熱量及び人工潜熱量分布の月平均値を各時刻について推定しているが、本研究では数値実験間の比較を容易にするため、人工潜熱については考慮しない。

大気場の初期値・境界値として気象庁が提供するメソ客観解析データを用いて現実的な値を与える。本研究では 3 時間毎に提供されている解析データを 1 時間毎に線形内挿して用いた。標高データには USGS の Gtopo30 を、水温の初期値は NOAA/ NASA AVHRR Oceans Pathfinder SST data の月平均値を、土壌データには FAO の Digital Soil Map of the World を、葉面積指数の算出には SPOT 衛星から得られた 10day composite NDVI データを用いる。初期の土壌水分量については根層において十分に湿潤な値 (マトリックポテンシャルで -20m) を一様に与える。陸面温度については大気最下層の気温と同じとして与える。

CReSS の主なオプション設定は、降水過程として Lin-Tao による 3 種類の氷相 (雲氷, 雪, 雹・霰) を含む微物理パラメタリゼーションを、乱流過程として乱流運動エネルギーに基づいた 1.5 次のクロージャースキームを用いる<sup>(11)</sup>。

図-1 に示す領域について空間解像度 2km, 鉛直 45 層

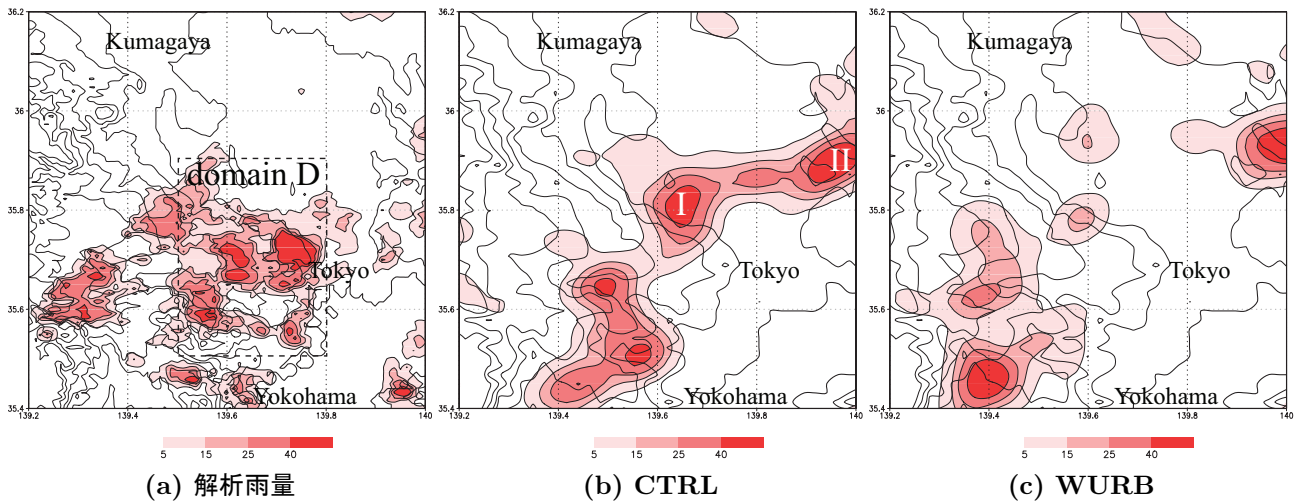


図-3 解析領域 B (図-1) における 3 時間積算降水量 (11-14JST; mm). 太い黒実線は標高 0m, 細い黒実線は標高 15, 30, 50, 80, 120, 200, 300m をそれぞれ表す. 白抜き I, II は 3 節で議論する降水域を表す.

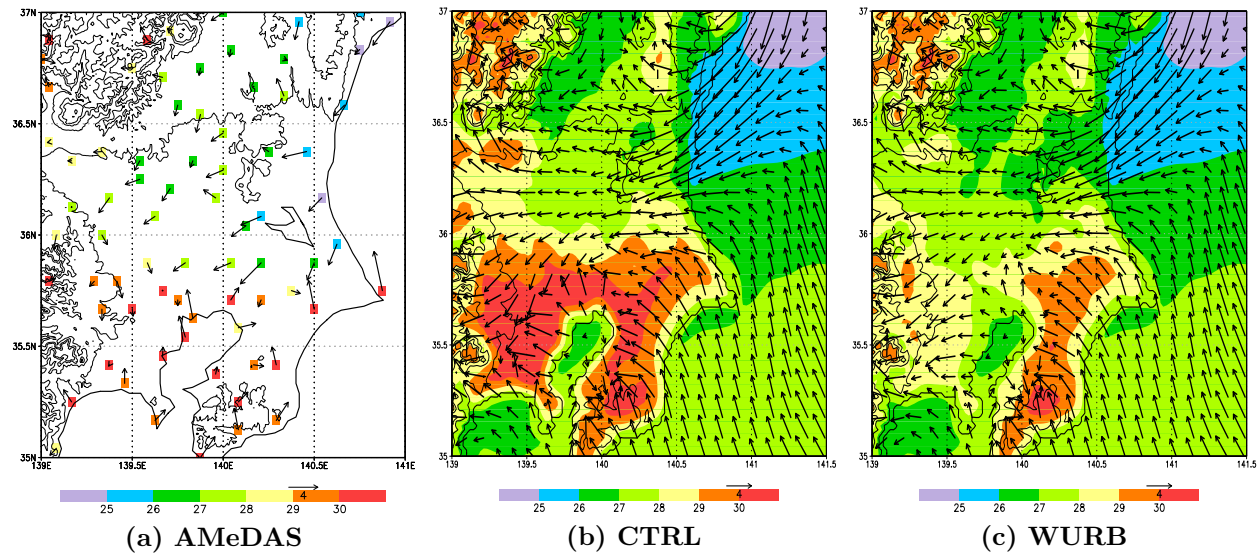


図-4 解析領域 A (図-1) における 2 時間平均 (10-11JST) 海面更正気温 (°C) と風速 (m/s). 黒い実線は図-1 と同様.

(平均 300m 間隔) を設定し計算を行う. 大気モデルの最下層は外部境界層 (日中に発達する対流境界層, 明け方の安定境界層など) を表現するために 50m の格子間隔を設定する. 都市・植生キャノピー層を含む接地境界層については陸面過程モデル内で取り扱われ, そこから外部境界層への熱・水蒸気・運動量フラックスの輸送が大気モデルへと伝達される.

Sen et al. (2004)<sup>13)</sup>が行った領域気候モデル実験を参考に, Lagged Averaged Forecast 法に基づき, 各数値実験について 2008 年 8 月 5 日 02JST から 07JST まで 1 時間ずつ初期時刻を変えて 6 メンバーずつ計算を行う. 各物理量の空間分布及び降水量のピーク値について, 同一時刻について各アンサンブルメンバーの値を算術平均して議論する.

Sen et al. (2004)<sup>13)</sup>では各数値実験につき 5 メンバーの計算を行い議論していることから, 本研究におけるアンサンブルメンバー数は議論にあたって十分と考えられる.

### (3) 数値実験の設定

本研究では都市加熱の影響のみに注目して議論するために, 都市幾何形状をそろえた 2 つの数値実験について比較を行う. 1 つは現実的な都市環境を考慮した実験で, 以後 **CTRL** と呼ぶ. もう一つは都市加熱を抑制するために, 人工排熱量を無視し, 都市を構成する屋根面・壁面・路面に水を散布し続け, 全面に水たまりを常に維持し続けた実験で, 以後 **WURB** と呼ぶ.

都市域における熱収支は次のように表される.

$$Rn + Qm = Hs + Le + G \quad (1)$$

ここに,  $Rn$  は純放射,  $Qm$  は人工排熱量,  $Hs$  は顕熱,  $Le$  は潜熱,  $G$  は貯留熱をそれぞれ表す.

図-2 に両実験での都市域における熱収支 (式 (1) の各項) を示すが, WURB では水たまりを維持し続けることにより吸収された日射のエネルギーはほとんど蒸発に使われ, 加熱は減少する. その一方で都市幾何形状 (建物高さ分布) は維持される.

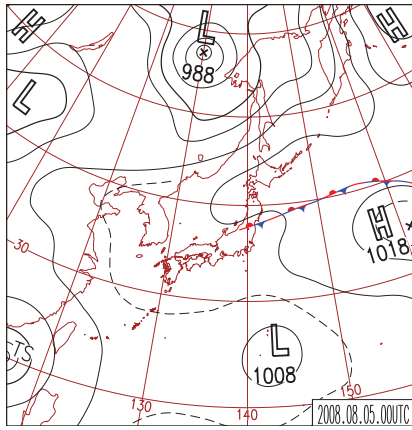


図-5 09JSTにおける地上天気図。

### 3. 数値実験の結果と考察

#### (1) 対象とする事例の概要

2008年8月5日には、防災科学技術研究所によるXバンドマルチパラメータレーダ(MP-X)により、11JSTから14JSTの間に東京都豊島区付近で4つの降水セルが観測され、12JSTから13JSTの間に時間降水量80mm以上の極めて局地的な強雨域(約5km<sup>2</sup>)が観測された<sup>14)</sup>。図-3(a)に示す気象庁解析雨量でも、MP-Xと比較して若干弱いものの同様に局所的な強雨域がとらえられている。

高橋ら(2009)<sup>15)</sup>は東京都における様々な地上観測データを収集し解析を行い、降水に先立つ10:40JST頃から北西風が強まり東京湾からの南風と収束し、その強化と強雨が対応していたことを指摘している。

図-4に10時～11時で平均したAMeDAS観測値における海面更正気温と風速を示す。全体的には鹿島灘からの北東風が卓越しているが、北関東と南関東の気温差に起因して東京付近で北寄りに風向が変化し、東京湾からの風と収束している。これは高橋ら(2009)<sup>15)</sup>が指摘した降水前の水平風収束と対応している。

図-5に地上天気図を、図-6に衛星赤外面像で見られた雲の様子を示す。衛星赤外面像は静止気象衛星Multi-functional Transport Satellite(MTSAT)のIR1センサーで観測されたものである。図-5では北関東に前線が、図-6では降水発生前の10JSTに北関東で前線に伴う雲が見られ、それらの影響により北関東で気温が低く、相対的に南関東で気温が高くなったと考えられる。

#### (2) CTRLの再現性

図-3(b)にCTRLにおける11JSTから14JSTにかけての3時間積算降水量を示す。図-3(a)と(b)を比較すると、CTRLでは東京における強雨域(図-3(b)中の降水域I)が若干内陸よりに現われており、また千葉における降水(図-3(b)中の降水域II)が観測よりも北側に現れ解析領域Bに入り込んでいるが、東京での強い降水域の存在がよく再現されている。

解析雨量で強雨が見られた領域D(図-3(a))における領域最大時間降水量の時系列を示す。CTRLでは12:20

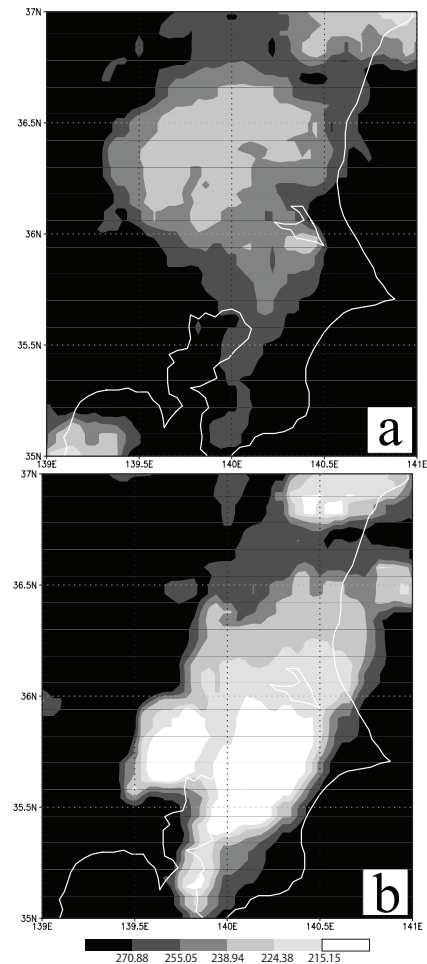


図-6 解析領域A(図-1)における衛星赤外面像での輝度温度(K;雲分布と対応)。(a)10JST、(b)13JSTの分布を示す。

～13:20の積算雨量でピーク値が見られ、76.4mm/hであった。2kmグリッド平均した気象庁解析雨量ではピーク値は12:00～13:00の積算雨量で見られ、61.0mm/hであった。CTRLではピーク値が観測値よりも若干大きく、時間が遅れているものの、領域最大時間降水量の時系列がよく表現されている。

また図-4(a)と(b)を比較すると、北関東と南関東の温度差、及び東京での北風と東京湾からの南風との収束がCTRLでも再現されている。

#### (3) CTRLとWURBとの降水量の差

図-3(b)と(c)を比較すると、CTRLで再現されていた東京での強雨域がWURBでは明らかに弱まっていることがわかる。

図-7に示す領域最大時間降水量時系列より、WURBでは13:40～14:40に42.9mm/hのピーク値がみられた。CTRLと比較するとピーク値が約40%減少し、ピークが現れる時間は80分遅くなった。各時刻について信頼水準95%でt検定を行ったところ、11:50～13:30JSTにかけて有意差がみられた。降水量ピーク値の減少とピーク時刻の遅れはこの時間帯の顕著な領域最大時間降水量減少に起因するため、初期状態を変えても同様

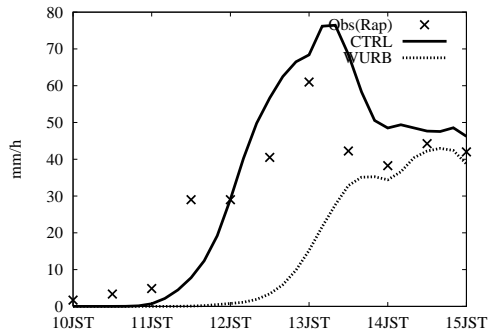


図-7 解析領域 D (図-3) における領域最大時間降水量の時系列. 十字は気象庁解析雨量による観測値, 実線は CTRL, 破線は WURB の結果を示す.

の影響がみられると考えられる.

このことから, この局地的大雨において都市加熱は, 都市域で周辺と比べて降水を強化し, 降水のピークを早める役割を果たした可能性が示唆される.

下重ら (2009)<sup>9)</sup>の結果は都市の幾何形状導入により降水のピーク時刻が遅れる可能性を示唆しており, 本実験で都市加熱により降水のピークが早まったことと対照的である. 幾何形状と都市加熱とどちらの影響が優勢となるかによって, 降水のピーク時刻に与える都市の影響が逆転することが予想される.

#### (4) 都市加熱が降水量に与えた影響

表-1 に降雨発生前の地表面熱収支の各項を示すが, 意図したように, 地表面から大気への加熱 (顕熱) が WURB では CTRL と比較して著しく小さくなっている. その結果, 図-8 (a) に示すように, 降水発生前に WURB で CTRL よりも都市域での地表面付近の気温が低くなっている.

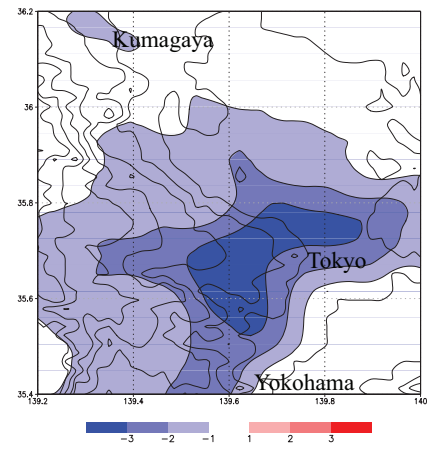
WURB では気温の減少に伴い都市域へ向かう風が弱まり, CTRL で再現されていた東京付近での北寄りの風と東京湾からの海風が弱まっている. その結果, 図-8 (b) に示すように都市域で水平風収束とそれに伴う上昇流が弱まり, 降水量の減少につながったと考えられる.

対照的に都市域周辺部では WURB で水平風収束とそれに伴う上昇流が強まっているが, それに伴い 14JST から 17JST にかけて都市域周辺部で解析雨量には見られない降水が WURB では現われている (図示せず).

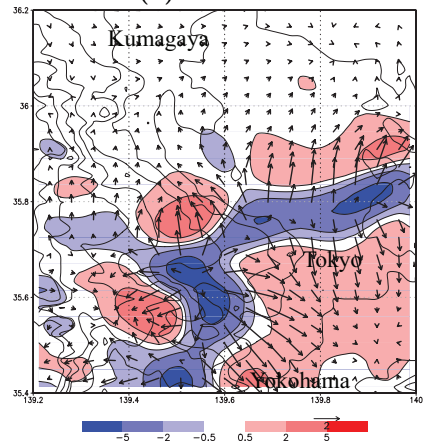
#### (5) 付随する蒸発量の変化が与えた影響

表-1 に降水発生前の 09JST から 10JST で平均した地表面熱収支式 (1) の各項を示す. WURB では顕熱が減少するのみならず, 付随して建物及び道路表面の温度上昇が抑制されて貯留熱が減少し, 表面温度の減少により上向き長波放射が減少して純放射が増大している. これらのエネルギーの大部分が蒸発で消費されるため, WURB では CTRL よりも潜熱が増大している.

表-2 に鉛直積算した水蒸気量である可降水量と大気の安定度を示す Showalter Stability Index (SSI) を示す. SSI は 850hpa 面の空気塊を断熱的に持ち上げた際



(a) 気温 (°C)



(b) 水平風ベクトル (m/s) 及び収束 ( $10^{-4}/s$ )

図-8 解析領域 B (図-1) における WURB と CTRL との 2 時間平均値の差 (10-11JST; WURB-CTRL). 黒の実線は図-3 と同様.

の温度を, 実際の 500hpa 面の気温から差し引いた値を示している. WURB では蒸発量 (潜熱) は増大しているが, 水平風収束の減少に伴い周囲からの水蒸気収束が減少しているため, 表-2 に示すように可降水量では CTRL と大きな差がみられない. 加えて WURB では地表付近の気温が低いため, 逆に SSI が高く, CTRL より大気が安定になっている.

このように, 東京では海に近く数値実験に付随した蒸発量の変化は周囲からの水蒸気収束によって補償されるため, 蒸発量の変化は降水に大きな影響を与えない結果になったと考えられる.

## 4. 結論

本研究では 2008 年 8 月 5 日に東京都豊島区雑司ヶ谷付近で発生した局地的大雨を対象に, 都市幾何形状を保存して都市加熱のみを変えたアンサンブル実験を行った.

数値実験の比較から, この局地的大雨ではアスファルト等の人為的土地被覆と空調や自動車からの人工排熱による加熱の強化が, 都市部の降水量を周辺部よりも増大させ, 降水のピークが現れる時刻を早める役割

表-1 09-10JST で平均した図-1 に示す解析領域 C における  
 地表面熱収支式 (1) の各項 ( $W/m^2$ ) .

	CTRL	WURB	WURB - CTRL
顕熱 (Hf)	174.2	75.8	-98.4
潜熱 (Le)	81.5	279.0	+197.5
純放射 (Rn)	439.4	490.3	+50.9
人工排熱 (Qm)	20.0	0.0	-20.0
貯留熱 (G)	203.6	155.5	-48.1

表-2 09-10JST で平均した図-1 に示す解析領域 C における可  
 降水量 (水蒸気の鉛直積算量) と大気安定度 (Showalter  
 Stability Index; SSI) .

	CTRL	WURB	WURB - CTRL
可降水量 (mm)	63.3	63.7	0.4
SSI ( $^{\circ}C$ )	1.2	1.3	0.1

を果たした可能性が示唆される。

下重ら (2009)<sup>9)</sup>の結果と比較すると、降水のピーク時刻に与える影響は都市加熱と幾何形状とで逆であり、どのような条件でどちらが優勢となるかが局地的大雨の予測向上に重要であると予想される。

都市加熱を減少させた実験では、都市域で気温が低下し水平風収束とそれに伴う上昇流が弱まったことにより、降水量が減少したと考えられる。この実験では都市加熱の減少に付随して蒸発量が増大しているが、水平風収束の減少に伴う周囲からの水蒸気収束の減少により補償されたため、水蒸気量及び降水量の変化にはつながらなかったと考えられる。

加えて本研究では都市の影響評価へのアンサンブル実験の活用を試みたが、今後はよりメンバー数、空間解像度を向上させていく必要がある。

#### 謝辞:

本研究で使用した人工排熱量分布データは東京工業大学神田学教授、妹尾泰史様より、東京都 GIS より得られた建物階数分布データは東京都より、MTSAT のデータは千葉大学環境リモートセンシング研究センターより提供していただきました。また、本研究は科学技術人材育成費補助金、山梨大学グローバル COE プログラム、科学研究費 基盤研究 (A)22246066、基盤研究 (S)22226010 による補助を受けました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 川畑 拓矢・小司禎教・瀬古弘・斉藤和雄：雑司ヶ谷豪雨に関するデータ同化・予報実験：GPS 水蒸気データのインパクト、日本気象学会 2009 年度秋季大会講演予稿集, p147, 2009.
- 2) Tanaka, K. : Development of the new land surface scheme SiBUC commonly applicable to basin water management and numerical weather prediction model, doctoral dissertation, Kyoto Univ., 2004.
- 3) 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, p96, 2009.

- 4) Shepherd, J. M.: A Review of Current Investigations of Urban-Induced Rainfall and Recommendations for the Future, *Earth Interactions*, 9, pp.1-27, 2005.
- 5) 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*, 45, pp.7-18, 1998.
- 6) 佐藤友徳・寺島司・井上忠雄・木村富士男：東京都市域における夏季の降水システムの強化, *天気*, 53, pp.479-484, 2006.
- 7) Moteki, Q., Ito, Y., Yorozu, K., Souma, K., Sakakibara, A., Tsuboki, K., Kato, T., Tanaka, K., Ikebuchi, S.: Estimation for Effects of Existence of Urban on Development of Cumulonimbus Clouds Using Atmosphere-Land Coupled Model of CReSiBUC. *Annuals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University* 48 C: 197-208, 2005.
- 8) 久田由紀子・戸高心平・松永信博・上地孝佳：福岡都市圏における局地的集中豪雨の数値シミュレーション, *土木学会水工学論文集*, 54, pp.367-372, 2010.
- 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, pp.277-282, 2009.
- 10) Souma, K., Sunada, K., Suetsugi, T., Tanaka, K.: The effect of urban area on a heavy rainfall event over Tokyo on August 5 2008. *Preprints of International Conference on MCSs and High-Impact Weather*: pp.353-356, 2011.
- 11) Tsuboki, K. and Sakakibara, A.: Large-scale parallel computing of Cloud Resolving Storm Simulator. *High Performance Computing*, Zima H. P. et al. (eds). Springer: Germany; pp.243-259, 2002.
- 12) 妹尾泰史, 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, pp.169-174, 2004.
- 13) Sen, O. L., Wang, Y., Wang, B.: Impact of Indochina Deforestation on the East Asian Summer Monsoon, *Journal of Climate*, 17, 1366-1380, 2004.
- 14) Kato, A., Maki, M. 2009. Localized Heavy Rainfall Near Zoshigaya, Tokyo, Japan on 5 August 2008 Observed by X-band Polarimetric Radar - Preliminary Analysis -. *SOLA* 5, pp.89-92, DOI:10.2151/sola.2009-023, 2009.
- 15) 高橋日出男・内山真悟・大和広明・大久保さゆり・高橋一之・鈴木博人：2008 年 8 月 5 日の東京都区部短時間強雨時における地上風の発散量時間変化, *日本気象学会 2009 年度春季大会講演予稿集*, p93, 2009.

(2011. 9. 30 受付)