

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	最新の都市パラメタリゼーションを導入した集中豪雨シュミレーション
Title(English)	
著者(和文)	仲野久美子, 仲吉信人, Alvin C.G. Varquez, 神田 学, 足立幸穂, 日下博幸
Authors(English)	Kumiko Nakano, Makoto Nakayoshi, Alvin Christopher Varquez, MANABU KANDA, Hiroyuki KUSAKA
出典(和文)	土木学会論文集B1 (水工学) , Vol. 69, No. 4, pp. I_335-I_360
Citation(English)	, Vol. 69, No. 4, pp. I_335-I_360
発行日 / Pub. date	2013, 3

最新の都市パラメタリゼーションを導入した 集中豪雨シミュレーション

SIMULATION OF LOCALIZED HEAVY RAIN
CONSIDERING THE LATEST URBAN PARAMETERIZATIONS

仲野久美子¹・仲吉信人²・Alvin C.G. Varquez¹・神田学³・足立幸穂⁴・日下博幸⁵
Kumiko NAKANO, Makoto NAKAYOSHI, Alvin C. G. VARQUEZ, Manabu KANDA,
Sachiho A. ADACHI, and Hiroyuki KUSAKA

¹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)

²正会員 工博 東京工業大学特任助教 理工学研究科国際開発工学専攻 (同上)

³正会員 工博 東京工業大学教授 理工学研究科国際開発工学専攻 (同上)

⁴非会員 博(理) 海洋研究開発機構ポスドク研究員 地球環境変動領域 (〒236-0001 横浜市金沢区昭和町3173-25)

⁵非会員 博(理) 筑波大学准教授 計算科学研究センター (〒305-8572 茨城県つくば市天王台1-1-1)

Urban localized heavy rainfall has become a serious issue especially during summer in the Tokyo metropolitan area. In order to analyze its relationship with urbanization, improved urban parameters were implemented into WRF together with high spatial resolution sea surface temperature (SST). For the simulation, the aerodynamic parameters such as roughness length and displacement height were prepared using a new feedback parameterization derived from large eddy simulations of real urban morphology.

Applying the new urban parameterization realized a more accurate simulation of localized heavy rainfall. The stagnation of heat and water vapor around city, and also the delay of sea breeze caused by the drag of urban geometry, increased heavy rain in Tokyo.

Key Words: Heavy rain, WRF, Urbanization, Tokyo, Sea breeze, Heat island

1. はじめに

近年、都市域に短時間で発生する集中豪雨が、突発的な事故を引き起こし、問題となっている。防災上、この都市型集中豪雨の正確な予測とメカニズムの解析は急務を要している。この現象を解明すべく、多くの研究機関において、統計学的もしくは数値力学的アプローチによる解析が行われてきている。

統計学的アプローチとして、高橋¹⁾は都市の高層ビルの風下域で局地的に豪雨の空間偏差が増加することから、建物群による上昇流とそれによる豪雨強化の可能性を指摘している。また、東京圏の都市影響を指摘する研究として、藤部²⁾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ている。

一方、数値力学的アプローチとして、メソ気象モデルを用いた豪雨のシミュレーションや都市パラメータの感度分析が行われている。都市が降水に及ぼす影響としては、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

(Kanda³⁾)。また、都市の大気循環を再現する陸面モデルの改良も著しい(Masson⁴⁾)。メソ気象モデルWRFでは、都市キャノピーの熱収支特性を再現できる都市キャノピーモデル(以下UCMと呼ぶ)が導入されている(Kusaka et al⁵⁾)。このUCMにより、都市材料による蓄熱効果、放射の多重反射により、夜間ヒートアイランドの再現性は劇的に改善された(Chen et al⁶⁾)。下重ほか⁷⁾は、UCM、時空間的に詳細な人工排熱・水蒸気、実在都市の修正粗度という、当時では最先端のパラメタリゼーションをメソ気象モデルWRFに導入し、集中豪雨の多事例解析を行い、都市影響による降水パターンを三種類に分類した。このような都市パラメタリゼーションの改良と、それらを用いた解析によって数値力学的予測も向上してきている。

しかし、現状のメソ気象モデルは、都市陸面モデル・海表面温度においてまだ課題を内包している。小田ら⁸⁾は、東京湾で直接測定した海表面温度(以下SSTと呼ぶ)が気象モデルの初期値に使用されるアーカイブのSSTと大きく異なることを示し、その上で観測されたSSTをWRFに組み込むことで、都市大気環境に有意な影響を及

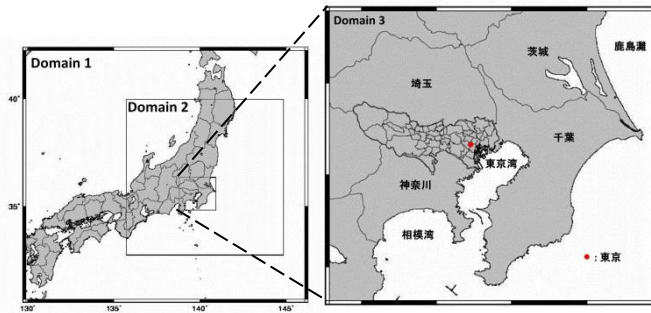


図-1 計算領域

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

表-2 物理モデル

Physics Settings	
Microphysics	New Thompson et al. scheme
Longwave Radiation	Rapid radiative transfer model
Shortwave Radiation	Goddard Scheme
Land Surface	Noah Land Surface Scheme
PBL scheme	Mellor-Yamada Nakanishi and Niino Level 2.5 Scheme
Cumulus Parameterization	Kain-Fritsch Scheme

ぼすことを指摘した。

都市陸面モデルの課題は、運動量・熱の交換現象に対する流体力学的な知見の不足である。これに対し、Kanda et al.⁹⁾はCOSMOとタワー観測データを統合して、運動量粗度から、ラフネスレイノルズ数を説明変数として熱の粗度（熱交換係数）を与える理論式を見出した。更に、宮本ほか¹⁰⁾は、東京・名古屋の100地点以上の最新の建物解像の詳細なLES（Large Eddy Simulation）によって、実都市に適用可能な新しい空気力学的パラメータ式を提案した。これらの計算手法によって、都市の地表面パラメータに関する、気象モデルのためのデータベース構築が可能になった。東京都は、ここ数十年で都市化が急速に進行しており、東京駅や新宿駅周辺におけるゼロ面変位・粗度長の著しい増加も示されている（福本¹¹⁾）。つまり、東京周辺の最新の運動量・熱粗度の気象モデルへの導入は、都市気象のより詳細な解析を可能にすると考えられる。

本研究では、下重ほか⁷⁾の計算条件に基づきながら、UCMを標準装備しているメソ気象モデルWRFに、最新の知見に基づく熱空気力学的パラメタリゼーションを導入することで、夏季集中豪雨に対する都市の影響について、その物理的メカニズムを考察する。下重らの研究では、

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-ARWのVersion2.2.1が用いられていたが、本計算では降雨再現性が向上されたと報告されるVersion3.3.1を採用した。また、SSTは、MODISプロダクトを同化し、時空間解像度・精度を高めた。

2. 新しい都市パラメタゼーションの概要

下重ほか⁷⁾の計算では、都市の空気力学的パラメータとして、MacDonald式に基づき算出した東京都の修正粗度長のみを考慮していたが、本計算では、運動量・熱粗度、熱交換係数の3点において下重ほか⁷⁾から改良を施した。まず、最新のLESより、実際の都市幾何を考慮し推定した、運動量粗度、修正粗度を関東全域に適用した（宮本ほか¹⁰⁾、Kanda et al.¹²⁾）。本計算で、最新の都市地表面幾何を考慮する詳細な都市パラメタゼーションを用いた数値計算を行った。WRFへの導入結果に関しては、Varquez et al.¹³⁾に詳しい。

また、熱粗度の計算には以下の式(1)を用い（Kawai et al.¹⁴⁾）、各時間ステップで計算を行った。

$$\kappa B^{-1} = (1.2 - 0.9\lambda_v^{0.29})Re^{*0.25} - 2.0 \quad (1)$$

ここで、 λ_v は植生比率、 Re^* はラフネスレイノルズ数である。

さらに、都市上の熱交換係数には、Kanda et al.⁹⁾によるトップダウンアプローチをUCMに適用し、キャノピー全体の熱交換と、各面別熱交換の整合性をもたせた。

3. 夏季集中豪雨数値実験の概要

本研究ではWRF-ARW (Version3.3.1)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。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。

(1) モデルの設定・計算条件

「OLD」，「NEW」，「STANDARD」の3条件を設定した。それぞれの設定条件を表-3に示す。「NEW」は最先端の地表面パラメタリゼーションが導入された計算であり、①Kusaka et al.⁵⁾のUCM、②妹尾他¹⁵⁾による人工排熱・水蒸気、③MODISによる高解像度海表面気温、④最新の都市運動量・熱粗度、修正粗度を導入している。尚、③のSSTはNASA地球観測衛星TERRA/AQUA搭載センサMODISの昼夜の一か月データを線形的に内挿したものをを用いた。「OLD」は①～④を導入せず、都市の地表面モデル化はWRF標準のスラブモデルを利用し、粗度・熱粗度は一定値が設定されている。また、新しい都市空気

表-3 計算事例

名称	SST	UCM	顕熱・潜熱	粗度・熱粗度
OLD	TSK	なし	なし	一定値
NEW	MODIS	導入	あり	理論式
STANDARD				一定値

力学パラメータ効果を検討するために、「STANDARD」として、「NEW」の粗度・熱粗度のみ一定値（WRF標準の値）としたものを計算した。OLD, NEW, STANDARDは、①～④以外は全て同条件で計算を行う。比較として、下重ほか⁷⁾におけるパラメタリゼーションによる解析の結果を次章で示す。尚、下重らはVersion2.2.1を使用し、①、②、MacDonald式から算出した修正粗度長を導入して計算を行った。

豪雨現象は非線形・カオス性による初期値依存性も強いことから、統計的な信頼性をあげるために、OLDとNEWについてのみそれぞれ初期値アーカイブ（2通り）と計算開始時刻（2通り）を変化させ、旧都市と最新都市の陸面設定（2通り）で、1降雨事例につき、計8ケースの計算を行った（表-3, 4）。初期値には、NCEP (National Centers for Environmental Prediction) の Global Final Analysesデータと、ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts) のInterimのデータの二種類を用いた。それぞれ、空間解像度は1度×1度、1.5度×1.5度、共に時間解像度は6時間である。また、計算開始時刻は、解析対象日の前日9:00と7日前9:00の二通りを設定した。尚、STANDARDは初期値としてNCEPのデータ、計算開始時刻は1日前の条件で1ケースのみ計算を行う。

(2) 解析対象日

解析対象日として、下重ほか⁷⁾の降雨分類を参考し、「広域メソイベント」から2007年7月29日、2008年8月16日、2008年8月21日を選んだ。広域メソイベントとは、降水に対する都市影響が関東広域にわたって明確に認められたイベントである。3事例と少ないが、初期値と計算助走時間を変化させ、1降雨事例につき、STANDARDケースも合わせて9ケースのアンサンブル統計を各事例で算出することで、都市影響抽出の信頼性を上げた。

4. 結果

(1) 積算降雨の違い

各日のOLD12ケースとNEW12ケースの全24ケースの降水当日の12:00～24:00の積算雨量解析結果を図-2に示す。また、同時に実況値として東京都下水道局が観測しているレーダー雨量データ（東京アメッシュ）による積算雨量値、及び過去の解析結果との比較として、下重ほ

表-4 OLDとNEWに関する4ケースの設定

名称	初期値	計算開始時刻
FNL	NCEP	1日前
FNL-1w	NCEP	7日前
ERA	ECMWF	1日前
ERA-1w	ECMWF	7日前

か⁷⁾の解析結果も積算雨量を算出し、同時に示す（図-2 SHIMOJU）。ただし、2008年8月16日のみ、アメッシュの雨量レンジの設定がOLD, NEW, 下重データのものとは異なることに注意して欲しい。解析された降水が強く解像され、同一レンジでは、実況の空間分布の評価が難しいためである。尚、アメッシュの図の点線は、2007年以前のレーダーの観測可能領域を示し、2007年7月29日の観測領域は狭くなっている。

地表面パラメタリゼーションの改良、高解像度SSTを導入したNEWケースで都市周辺の豪雨が増加する傾向を示し、また、下重の結果と比較すると、降雨の空間分布の再現性も向上していることが確認される。SST、都市空気力学的パラメータの精緻化により改善したと言える。豪雨の発生メカニズムについては次節で考察する。

(2) 解析豪雨メカニズム

都市効果を気象モデルに導入することで、都市域での局地的集中豪雨を強める傾向がシミュレーションによって再現できた。ここでは、2007年7月29日の事例に焦点を当て豪雨発生メカニズムの考察を行う。

2007年7月29日の事例におけるOLDとNEWの降雨メカニズムの違いは、当日の大気下層の水蒸気の陸上での輸送の違いが大きな要因になっている。OLDでは、当日11:00頃から東風が千葉上空で卓越し始め、房総半島北部で降った雨による外出流も伴って、地上の温位を下げながら、東京に吹き込む（図略）。東京上空に流れ込む風は、12時の段階で東京都町田の南部上空で迂回し始める（図-3a 赤矢印箇所）。迂回後、風は北西方向に向きを変え、時間の経過とともに東京と埼玉上空を北上する風が強まる。図-3に12:00と14:00の関東域での最下層温位と混合比を示す。OLDでは相模湾からの顕著な海風侵入開始を確認できないが、房総半島から流れ込み、町田付近で迂回した風によって内陸への水蒸気の供給が行われていた。その結果、14時にOLDでは埼玉県上空の水蒸気量が増加し、東京上空では減少していることがわかる（図-3 赤楕円部）。一方で、NEWでは13:00に相模湾から海風が侵入を開始する（図-4 赤線部）。これは、NEWでは地上一大気の熱交換が促進され、地上温位が高くなることで、海上との温度差が増大し、海風の侵入を促進させたためと考えられる（図-3c, d）。その後、NEWでは14:00～15:00の間に茨城県上空で発生した降雨による外出流、鹿島灘からの東寄りの風と、相模湾からの海風が

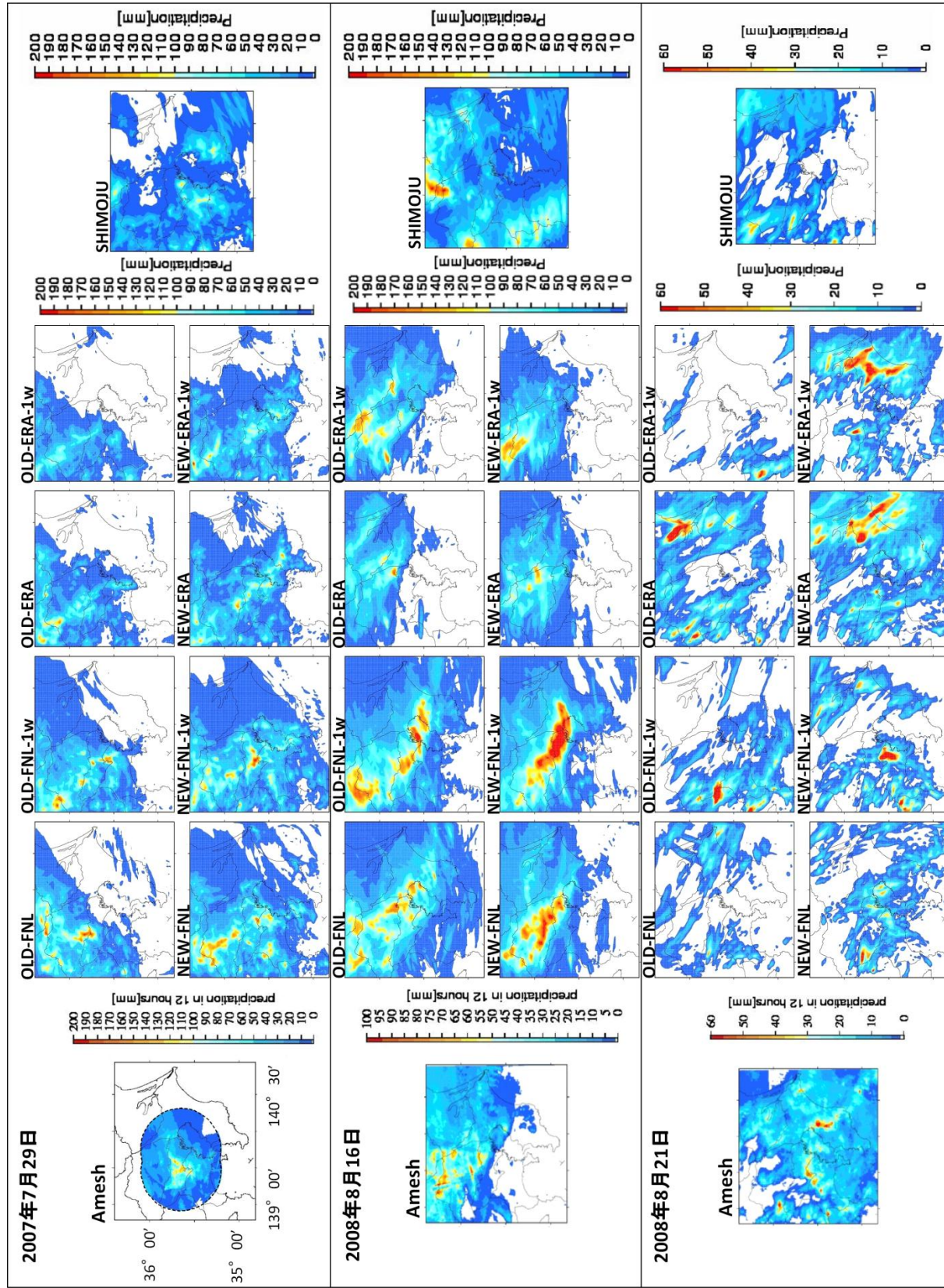


図-2 降雨当日の12:00~24:00の積算雨量 (左:アメッシュ, 中央:解析結果, 右:下重ほか⁷⁾ 解析結果)

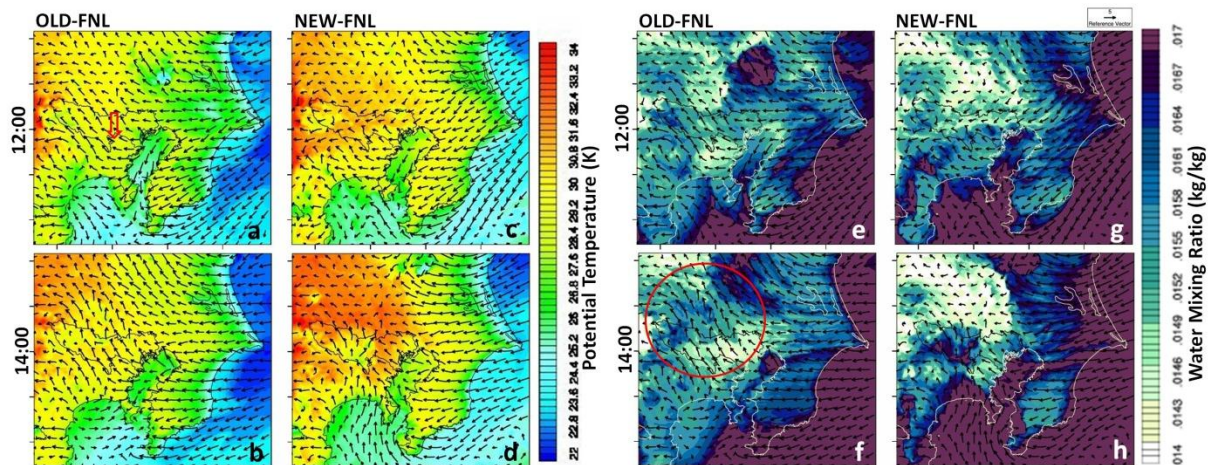


図-3 2007年7月29日における各時刻の最下層温位（左）、最下層混合比（右）

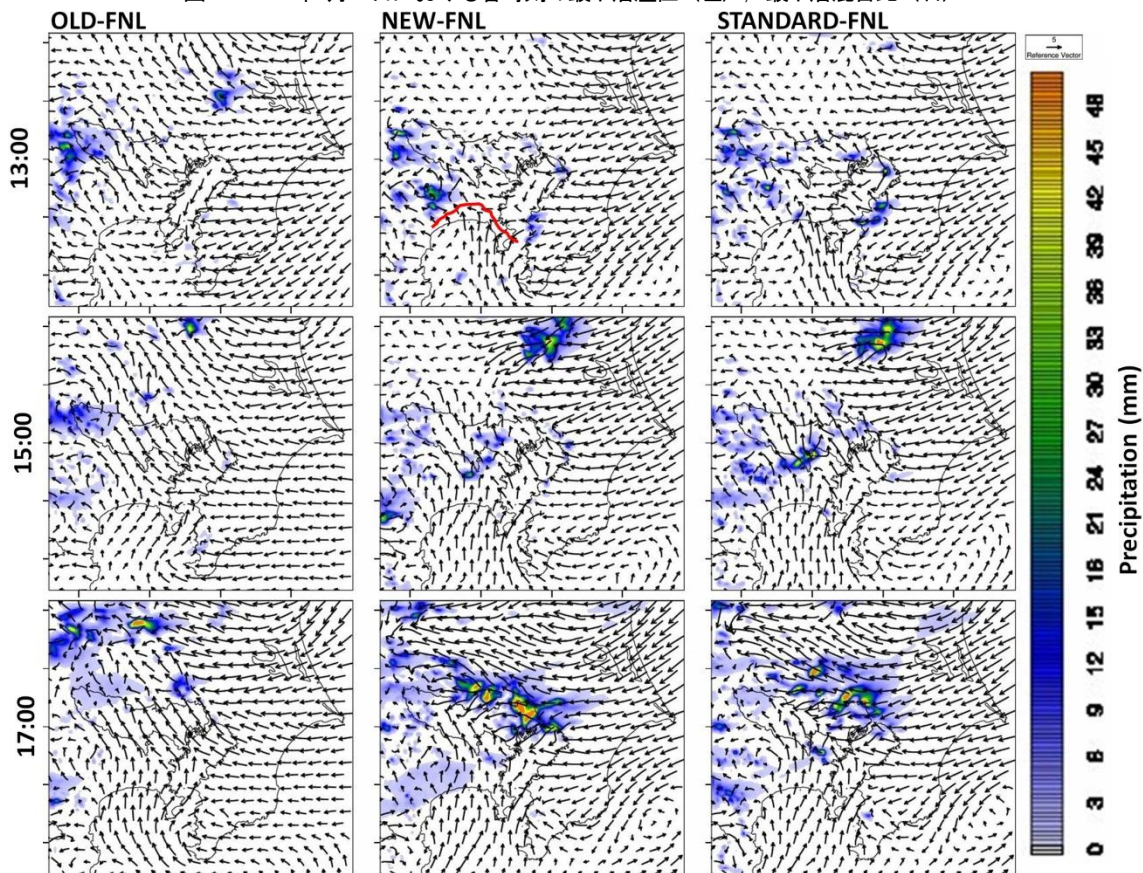


図-4 2007年7月29日における各時刻の一時間積算雨量（左：OLD 中央:NEW 右：STANDARD）

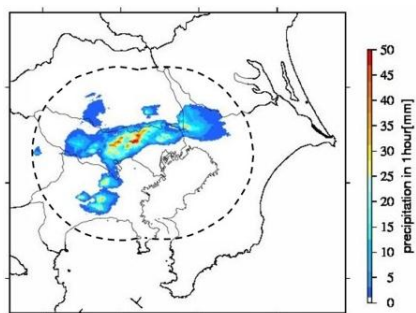


図-5アメッシュによる2007年7月29日13時の一時間積算雨量

17時頃東京都北上空に収束ラインを形成し、東京都心に強い雨を降らせる（図-4）。これに対し、OLDでは、湿った空気が溜まった埼玉上空で収束を作り、強い雨を降らせた。以上のことから、都市上空の熱と水蒸気の滞留効果と、温度差からもたらされる海風侵入が都市上での降雨を強める要因として働いていることが示された。尚、7月の降雨に見られたような都市の熱的・空気力学的バッファ効果は他の事例においても、都市の豪雨を助長させていた（図略）。図-5に、当日の豪雨が始まる13時の実況アメッシュによる1時間積算雨量の図を示す。実況に比べ、降雨開始が解析で約3~4時間遅くなっ

ているが、実況に近い位置で雨を降らせていることから、再現性が向上していると言える。

5. 議論

2007年7月29日の計算結果から、NEWでは、相模湾からの海風の侵入と、鹿島灘からの北東風と房総半島北部で発達した積乱雲による外出流との収束が東京都心に強雨をもたらすことが確認された。ここではNEWとSTANDARD、つまり都市の熱・空気力学的作用によるバッファ効果に焦点を当て議論する。どちらも相模湾・東京湾からの海風と東寄りの風の間で収束域を形成し、強い雨を降らせている。しかし、粗度・熱粗度を考慮しないSTANDARDの場合では相模・東京湾からの海風がやや内陸まで侵入し、都心域より北部で強雨をもたらしており、降雨強度も若干弱くなっている。これは、NEWにおける都市の粗度・熱粗度の作用により都心上空で海風が滞留されたためと考えられる(図-4)。新しい地表面パラメタリゼーションによって、都市上空の風に対する熱・水蒸気の滞留効果と、風の迂回と上昇をもたらす障壁効果が働いていると言える。以上より、都市降水に対する数値シミュレーションにおいて、熱的效果に加え、熱・空気力学的効果の重要性が確認される。

6. 結論

下重ほか⁷⁾により抽出された都市型豪雨日9事例のうち、降水に対する都市影響が関東広域にわたって明確に認められた3事例を取り上げ、都市影響を考慮しない「OLD」と高解像度の海表面温度と最新の都市パラメータを導入した「NEW」の条件を設定し、シミュレーションで比較した。本研究の結論は以下の通りである。

- (1) 最新の都市パラメタリゼーションを導入することで、都市上空での雨が強化され、さらに実況降雨との再現性が向上した。
- (2) 豪雨発生メカニズムとして、都市域における熱・水蒸気の滞留と、それに伴う海風侵入の影響が示された。
- (3) 東京都心の詳細な運動量・熱粗度は、水平風を迂回させる効果をもち、収束ラインの形成位置および降雨の発生位置を変化させ、都市上空の降雨強化に影響を与えることが指摘された。

謝辞：本研究は、文部科学省の委託事業「気候変動適応研究推進プログラム、フィードバックパラメタリゼーションを用いた詳細なダウンスケールモデルの開発と都市暑熱環境・集中豪雨適応策への応用(代表：飯塚悟)」及び、科学研究費補助金 基盤研究(B)(課

題番号：21360233)による支援を受けた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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
- 3) Masson, V.: A Physically-Based Scheme for the Urban Energy Budget in Atmospheric Models, *Boundary-Layer Meteorol.* **94**, 357-397, 2000.
- 4) Kanda, M.: Progress in urban meteorology: A review, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **85B**, 363-383, 2007.
- 5) 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.
- 6) Chen, F., Kusaka, H. et al: *The integrated WRF/urban modeling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems*, *Int. J. Climatol.*, **31**: 273-288, 2011.
- 7) 下重亮, 仲吉信人, 神田学: 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, *土木学会水工学論文集*, **54**, 349-354, 2010.
- 8) 小田僚子, 神田学, 森脇亮: 直接測定に基づく東京湾解表面温度が都市の気温へ及ぼす影響, *土木学会水工学論文集*, **52**, 283-288, 2008.
- 9) Kanda, M. et al: A Simple Energy Balance Model for Regular Building, *Boundary Layer Meteorology*, **116**, 423-443, 2005.
- 10) 宮本崇史, 稲垣厚史, 神田学: LESを用いた都市気象モデルのためのフィードバックパラメタリゼーション, *地球環境シンポジウム講演集*, **19**, 171-176, 2011.
- 11) 福本恵梨子, 仲吉信人, 神田学: 東京における夏季集中豪雨の空間偏差—詳細な都市幾何形状データを考慮して—, *土木学会水工学論文集*, **55**, 397-402, 2011.
- 12) Kanda, M. et al: New Aerodynamic Parameterization for Real Urban Surfaces derived from LES. *Proceedings of the 8th international conference for urban climate*, **118**, 2012.
- 13) Varquez, A. C. G., Kanda, M. et al: Tokyo localized rainfall simulation using improved urban and sea parameterized WRF-ARW. *ICUC8*, **79**, 2012.
- 14) Kawai, T et al.: Evaluation of the Simple Urban Energy Balance Model Using Selected Data from 1-yr Flux Observations at Two Cities. *Preview, Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **Vol 8, No4**, 693-715, 2009
- 15) 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.