

5. 都市の集中豪雨の数値シミュレーションと対策

神田 学*・仲吉 信人**・Alvin Christopher Galang Varquez**

1. 都市の集中豪雨—横断的アプローチの必要性

1.1 都市の集中豪雨—研究の現状

都市が降雨に及ぼす影響は、古くはMETROMEXを始め、数多く研究が為され、都市の風下域での有意な降雨増加が指摘されている(例えば、Kanda 2007)。一方、時空間的に都市より大きなスケールの影響も示唆されている。都市は降雨を助長するか否か、という問いに対して、都市とそれ以外の影響の分離が難しく、合意が得られていない。

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(例えば、藤部 1998 ; 藤部ほか 2002)。Fujibe *et al.* (2009) は、気象観測所の資料解析により、6時間前降水の無い夏期午後の降水がここ100年間で30%増加していること、さらにAMeDAS資料を加えた空間パターン解析により、それがヒートアイランド効果によることを明らかにした。高橋ほか(2011)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大きいことを報告している。数値モデルでも都市影響による降雨増加を指摘する研究がいくつもあるが(例えば、Yonetani 1982 ; 妹尾ほか 2004 ;

Matheson and Ashie 2008) 解析事例数が少なく、都市キャノピーが考慮されていないなどの課題が残されている。また、Kusaka *et al.* (2009) が指摘したように、都市降雨の数値計算にはカオス性が現れやすいため、1, 2事例だけを対象とした既存研究の結果をもって都市が降水に及ぼす影響を確定することはできない。

1.2 詳細な工学的パラメタリゼーション導入の必要性

都市の集中豪雨解明に対する気象学的なアプローチは概ね以下のような点にまとめられるだろう。

(1) 観測網・観測技術の充実

時空間解像度の高いKuレーダの利用や複数のレーダーネットワークによる稠密観測(例えば、文科省振興調整費「気候変動に伴う極端気象に強い都市創り」)による詳細な現象の把握が進んでいる。

(2) 可降水量データ同化手法の進展

GPS可降水量や水蒸気リモートセンシングの開発・改良による水蒸気情報の同化技術が進展し、それに伴い降水現象の予報技術が向上している。

(3) 時空間解像度の向上

このような気象学的アプローチに対して、詳細な都市の地表面情報や人間活動はどこまで考慮すればいいのだろうか？ これらを便宜上、工学的アプローチと呼ぶ。そのポイントは以下のようにまとめられるだろ

* (連絡責任著者) 東京工業大学大学院理工学研究科。
kanda.m.aa@m.titech.ac.jp

** 東京工業大学大学院理工学研究科。

© 2014 日本気象学会

う。

(a) 人工排熱の時空間分布

エネルギー消費はその日の最高気温によって大きく左右されるし、平日・休日でも20%程度異なる。東京の都市化による気温上昇に、人工排熱は都市陸面による熱収支変化と同程度の影響を持っていると考えられる。Fujibe (1987) は、休日は平日に対して有意に0.2°C気温が下がることを指摘している。

(b) 建物情報 (高さ・建ぺい率など)

都市陸面と言っても超高層ビルから低層住宅街まで様々であり、ゼロ面変位や粗度長に大きな違いを生じさせるだろう。都市構造と流体力学的パラメータの関係は工学分野で活発に研究されている。

以上より、観測の稠密化やモデル解像度の向上という気象学のアプローチの進展と歩調をあわせて、それにふさわしい時空間解像度の人工排熱データや都市の流体力学的パラメータという工学的アウトプットを整備し、気象学的枠組みに組み入れていくことは、局地的性の高い都市の集中豪雨の予測向上に有益であろう。

第1表 抽出された局地的集中豪雨日 (2005-2008)。

*は「都市New」と「都市Old」の降雨に有意な差が認められなかった日

**は降雨が全く再現されなかった日

年	抽出された局地的集中豪雨日
2005	9/4, 9/11, 8/15*, 8/23*, 7/25**
2006	8/24, 7/15, 8/17*
2007	7/29, 8/28**
2008	7/29, 8/16, 8/21, 8/4, 9/7*

第2表 計算に用いた4重ネストグリッド。

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

第3表 数値実験の概要。

* UCM は都市キャノピーモデルを意味する

	UCM*	人工排熱	ゼロ面変位
都市New	○	○	○
都市Old	×	×	×
都市New・ゼロ面変位なし	○	○	×

2. 都市影響を考慮した関東夏季の集中豪雨解析

2.1 局地的集中豪雨発生日の抽出

総観規模の影響による降雨を排除するため、藤部ほか (2002) 及び中西・原 (2003) の対流性降雨の抽出条件を参考に抽出した。降雨量については、東京建設局の地上降雨データおよび AMeDAS を、気温については AMeDAS を使用した。その結果、2005年～2008年の間で15日の集中豪雨日が抽出された (第1表)。

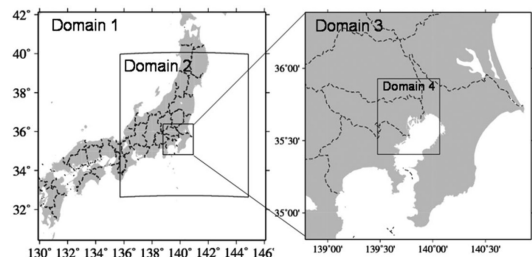
2.2 モデルの概要

本研究では領域気象モデル Weather Research and Forecasting model (WRF) (Skamarock *et al.* 2008) を使用する。計算領域 (第1図) は東京を中心とする4重のネストグリッドでその情報を第2表、数値実験の設定条件を第3表に、それぞれ示す。

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)、標高データは、国土数値情報50 mメッシュ、土地利用データは国土数値情報100 mメッシュを、それぞれ用いた。解析対象日前日の09:00から48時間分の計算を行った。

都市影響として、都市キャノピーモデル (第3表中では UCM と略記)・人工排熱・ゼロ面変位、の3点を考慮した。都市キャノピーモデルとして WRF に標準搭載されている日下モデル (Kusaka *et al.* 2001) を使用した

人工排熱として月別の1時間・300 m解像度の Moriwaki *et al.* (2008) のデータベースを使用した。これは、詳細な東京の建物情報と各種エネルギー統計資料に基づき用途別単位床面当たりのエネルギー消費原単位を積み上げて算定されたものである。ゼロ面変位としては、下重ほか (2009) のデータベースを使用した。これは、東京における実在建物のリアルな3次



第1図 4重ネストによる計算領域 (下重ほか2010より引用)。

元 GIS データを基に、都市の幾何情報（平均高さ・建ぺい率など）から工学的実験式（Macdonald *et al.* 1998）を用いて算定したものである。第 2 図上には、領域 4 における人工顕熱（15:00；8 月データ）および第 2 図下には、ゼロ面変位を示す。大規模商業地域やオフィス街においては、人工排熱は数百 Wm^{-2} に達し、ゼロ面変位は、10~20 m の高さに達する。

本論中で、上記 3 点の都市影響を考慮した計算を「都市 New」、3 点を考慮しない計算を「都市 Old」と略称することにする。ただし、「都市 Old」は、都市が存在しないことを意味するのではなく、従前の植生キャノピー型の都市陸面モデルを用い、人工排熱・ゼロ面変位を考慮しない計算を意味する。WRF および WRF の都市気象への応用については解説（日下 2009；神田 2009）を参照されたい。

2.3 都市がメソ前線の進行に及ぼす遅延効果

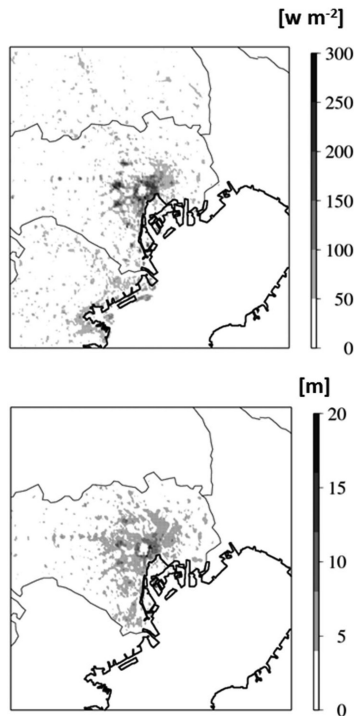
集中豪雨は、強い非線形現象なので、実に様々な空間パターンを呈するが、豪雨影響を議論する前に、メソ前線の時空間的な進行に対する都市の影響として

以下に述べる「遅延効果」を想定すると、考察が見通しの良いものになる。そこで、東京湾海風の進入に対して都市の遅延効果が顕著に表れている 2004 年 8 月 10 日の解析事例を用いて、その特徴を整理・紹介する。解析は、第 3 表に示す 3 ケースである。「都市 New」、**「都市 Old」**に加え、都市 New の設定でゼロ面変位だけ考慮しない「都市 New・ゼロ面変位なし」の計算も行った。

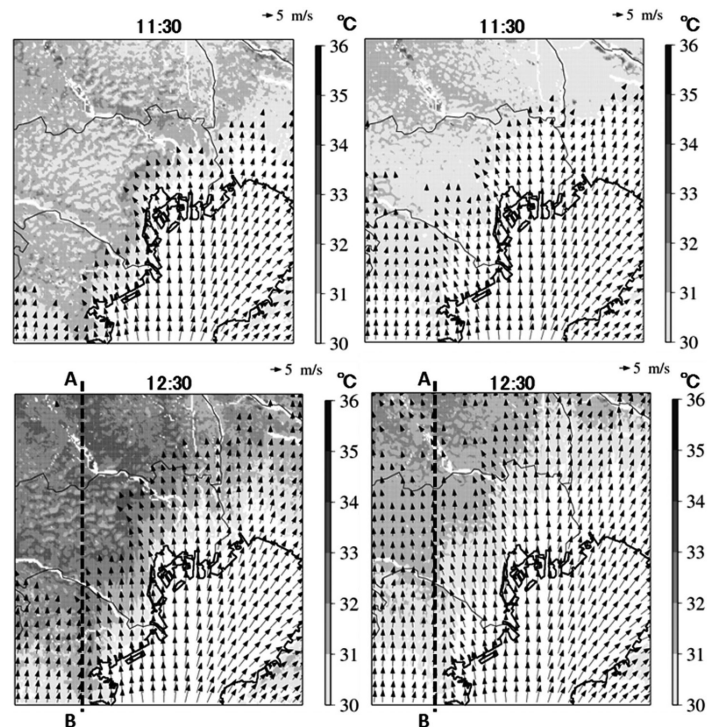
遅延効果は、以下の 2 点で特徴づけられる。

- (1) 都市域で、メソ前線（局地不連続線）の進行が停滞し、それにより運動量・熱が滞留する（滞留効果）。
- (2) メソ前線が都市域を通過する際、水平風が分流・迂回し、風下域で水平風の再収束と上昇流を生み出す（障壁効果）。

第 3 図に、11:30 および 12:30 において東京湾海風が 23 区へ進入していく様子を地上気温と共に示す。「都市 Old」では、海風前線が都心を通過して内陸部の北へ抜けている。「都市 New」では、海風前線が高温化した都心部に引きずられるようにやや西向きに偏向



第 2 図 上：8 月 15:00 の人工排熱の空間分布，下：ゼロ面変位の空間分布。



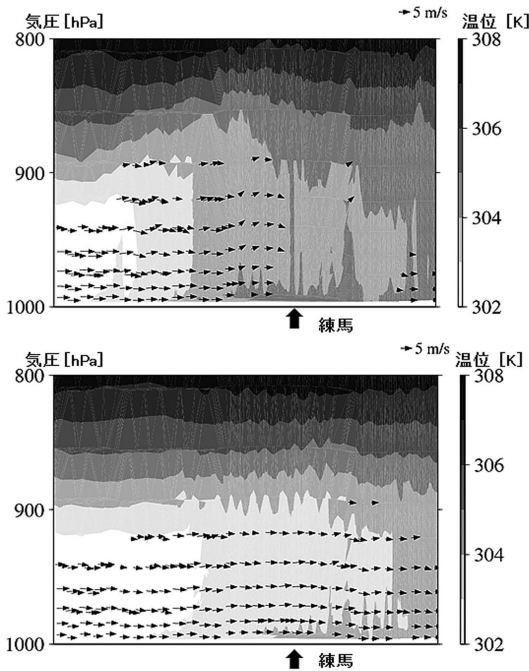
第 3 図 海風侵入時（上：11:30，下：12:30）の風系場と地上 2 m 気温分布。左：都市 New，右：都市 Old。海風前線が見えやすいように 2 ms^{-1} 以下の微風速域は、ベクトルを表示していない。

し、かつ都心部で停滞している。第3図下図のA-Bの南北軸に沿った大気境界層の鉛直断面を比較してみる(第4図)。練馬近傍において、海風前線が停滞し、それに伴って地表面から供給される熱が練馬周辺で滞留し、鉛直混合によって地表近傍だけでなく境界層全体に高温化が及んでいる。以上より、都市のバッファー効果の第一の特徴である滞留効果が示された。これは、都市の熱的効果と力学的効果によってもたらされている。熱的効果とは、都市キャノピーの熱収支改変と人工顕熱により、都心部に熱低気圧を生みだし、海風前線が停滞しやすい水平圧力場を形成する効果である。力学的作用とは、都市の大きな表面抵抗により、水平方向の運動量が鉛直混合に使用され、結果として海風前線が減速する効果である。

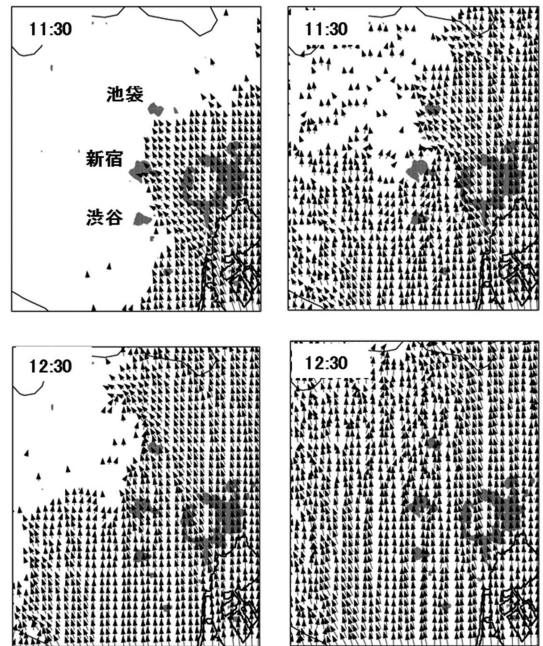
次に、障壁効果を示すために、第3図の都心部をより拡大して海風前線が通過する前後の風系場と大商業地の位置関係に着目してみる(第5図)。11:30時点では、都市Oldでは、すでに東側および南側から入った海風前線が池袋・新宿・渋谷といった都心西部の大商業域に到達し、かつ、さらに内陸へ侵入しようとし

ている。都市Newでは東側から入った海風前線が、かろうじて池袋・新宿・渋谷に達しているように見える。12:30には、都市Oldでは海風前線は完全に都心部を通過して内陸部へ抜けている。一方、都市Newでは海風前線が池袋・新宿の大商業域で停滞、取り残されたように海風の侵入が遅れ、2大商業地域を迂回するように南東風と南からの海風が進行している。一方、「都市Old」では、そのような前線の遅延と都市風下域での水平風収束は見られない。

障壁効果をより具体的かつ明瞭に裏付けるために、海風が都心の西を通過した直後(12:48)の風系場を「都市New」と「都市New・ゼロ面変位なし」で比較して見る(第6図)。今度は、「都市New」・「都市Old」の比較ではなく、いずれも都市Newで、ゼロ面変位の有無だけが両者の違いであることに留意されたい。一見、大きな違いがないようにも見えるが、「都市New」では水平風が新宿を分流・迂回し、その風下域で再収束する傾向がより強調されている。第6図中のA-B断面における上昇流を比較してみると、ゼロ面変位、すなわち都市構造物によるわずかな地形



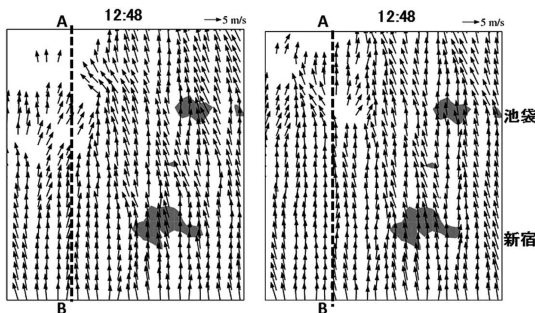
第4図 線分AB(第3図)における温度と風速の鉛直断面図。上:都市New, 下:都市Old, 図の右端がAで左端がB。



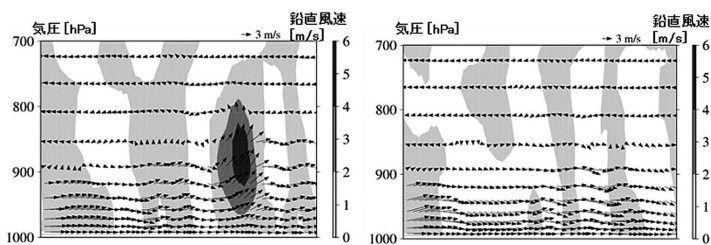
第5図 池袋・新宿・大手町周辺を海風前線が通過する前後における風系場。左:都市New, 右:都市Old, 上:11:30, 下:12:30。灰色部はゼロ面変位が8m以上で、ビル群が存在している地域に対応する。

隆起，を考慮するだけで，風下に顕著な上昇流が発生していることが示される（第7図）．このような微地形の風速場に対する影響は，数 km 解像度の通常のメソスケール計算では現れず，空間解像度を300 m にまで上げることによって初めて捉えられる．

既存研究においても，都市のバッファー効果の特徴が指摘されている．Yoshikado (1992) は理想化された2次元の数値実験からヒートアイランドが海風の内陸進入を遅延させることを指摘している．この研究では，力学的効果が考慮されていないので，熱的效果だけで前線遅延が起こることを示唆している．Kusaka *et al.* (2000) は，都市化が関東の風系場に及ぼす影響を数値実験により調べ，熱的效果による海風進入の遅延効果を指摘している．Bornstein and Lin (2000) は降雨システムが都市域を通過する際に，分岐迂回するケースがあることを指摘し，都市の障壁効果ではないかと，推論している．



第6図 池袋・新宿周辺を海風前線が通過した直後(12:48)の風系場. 左:都市New, 右:都市New・ゼロ面変位なし.



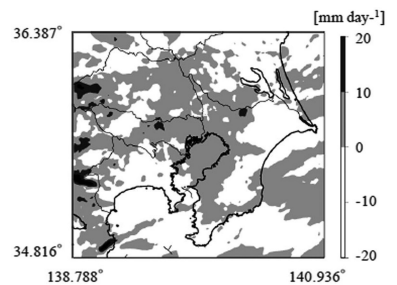
第7図 AB断面(第6図中)における上昇流の鉛直断面図. 左:都市New, 右:都市New・ゼロ面変位なし. 図の右端がAで左端がB.

2.4 降雨の都市影響に関する事例解析と考察

第1表に示した2005年から2008年までの全15降雨事例について「都市New」「都市Old」の数値解析を行った．見出された都市影響の結果の概要は，以下のとおりである．9事例（第1表中の日付にシンボルなし）では，「都市Old」に比して「都市New」に顕著な降雨強化が認められ，4事例（第1表中の日付に*付加）では，「都市New」「都市Old」に有意な差が認められず，2事例では，降雨そのものが全く再現されなかった．

事例数が依然として少ないので短絡的な結論を下すことは出来ないが，この結果から，2つの重要な示唆が得られる．1つは，「都市Old」に比して「都市New」が顕著に降雨を減少させる事例は認められなかった点である．過去の研究における事例解析では，都市影響が降雨を減少させる事例（例えば，Matheson and Ashie 2008）も報告されているので，大きな違いである．その原因として，本解析の空間解像度(300 m)が向上していることと，都市の詳細なパラメタリゼーションの導入効果，などが考えられる．もう1つは，降雨再現に失敗している2事例や，一般的に実測降雨と必ずしも時空間的に一致していない解析結果も多いことから（図略），都市影響のパラメタリゼーションと並行して，気象学的予測技術の向上が引き続き大きな課題であることである．ちなみに本解析では，データ同化やパラメーターチューニングなど実降雨との整合性を向上させるようなことを一切行っておらず，都市パラメタリゼーションの導入による解析降雨の違いとそのメカニズムに焦点をあてている．

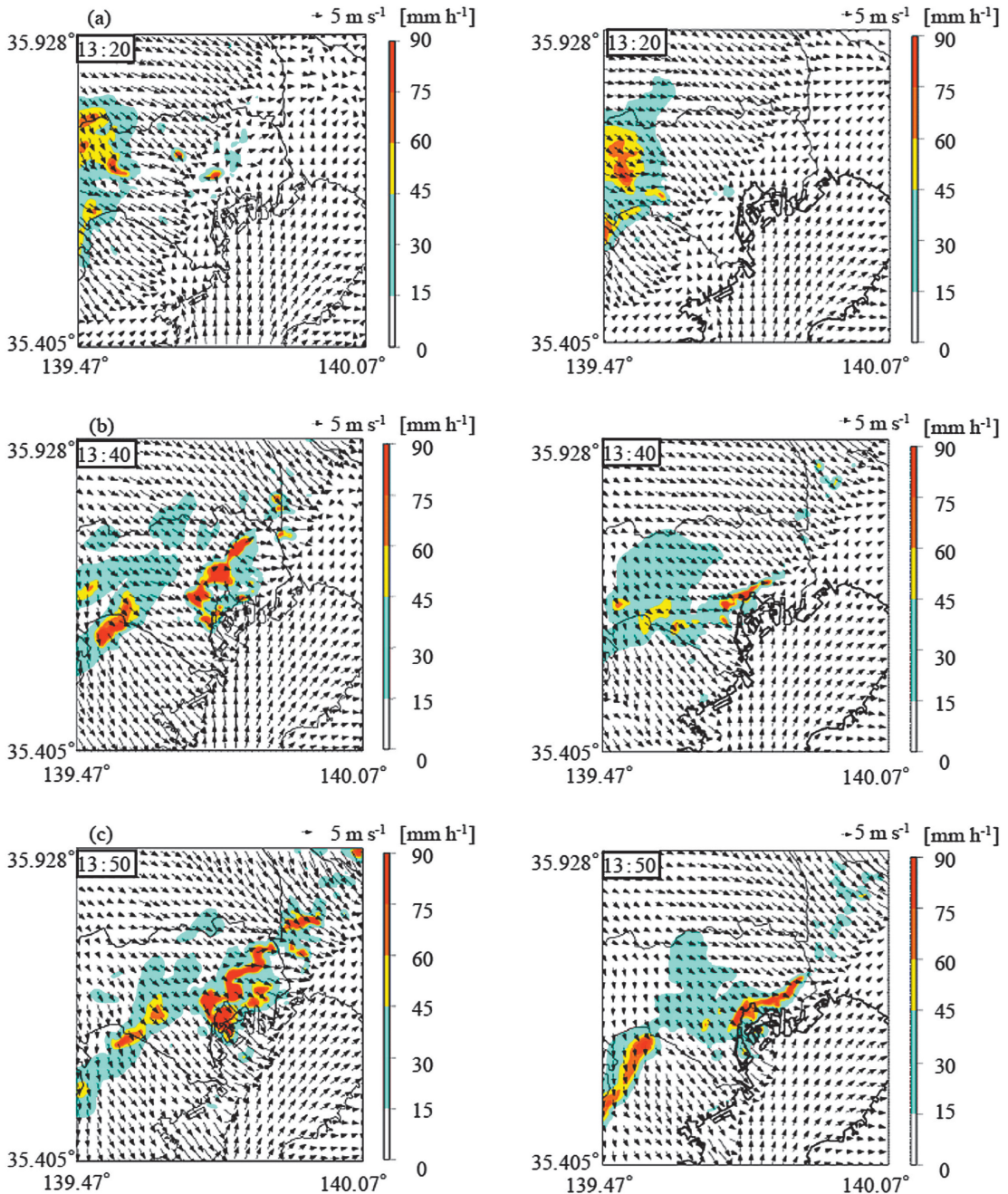
全15事例の降雨量の計算結果から日平均降雨量を算出し，「都市New」から「都市Old」を差し引いたの



第8図 都市型集中豪雨日15事例に関する「都市New」と「都市Old」の平均日降水量の差(New-Old).

が第8図である。降雨偏差の空間的なバラツキが大きいものの、東京湾と都心部を中心に、正の降雨偏差、その周辺で負の偏差、さらに山岳域（特に西部）で再び正の降雨偏差、という傾向が読み取れる。すなわ

ち、都市の降雨に対する影響は、都心部の局所影響に限らず、広域関東メソ循環の時空間スケールで捉えるべきであることが示唆される。ただし、降水事例に限られていること、また、無降水日を含めず、降雨日の



第9図 多摩地域で発生した降水セルの時空間発達に及ぼす都市のバッファー効果、2008年8月16日の広域メソ型の降水事例。左:都市 New, 右:都市 Old. (a)13:20, (b)13:40, (c)13:50.

みを計算対象としていることより、今回の解析事例だけでは統計的な有意性は保証されない。しかしながら、第8図の傾向は、解像度や都市設定が異なるものの統計的に高い信頼性の高い8年間の8月のアンサンブル解析結果 (Kusaka *et al.* 2009) とも類似している。

2.5 発達する降雨セルに対する都市の直接的影響

事例解析結果では、都市影響の履歴を受け、豪雨の鍵を握る西部山岳での降雨セルや、都心の気象場そのものが、豪雨前すでに「都市 New」, 「都市 Old」で大きく異なっていた。もしも、豪雨日の気象場や西部山岳域の降雨セルが全く同じ初期条件として与えられたら、都市は、発達・進行する降雨セルに対してどのような直接的影響を及ぼすであろうか。そこで、豪雨が比較的良好に再現された2008年8月16日の事例について、「都市 New」の豪雨直前の10:00の計算結果を初期条件として与え、都市陸面だけを「都市 Old」に置き換えて、その後の時間積分を行った。その結果を第9図に示す。13:00以降の降雨強化の様子を Domain 4 で詳しく追った (第9図左)。山岳域からの降雨セルが都心に近づいてくると、降雨セルからの外出流と東京湾海風前線の収束線近傍で降雨が開始する (13:20; 第9図 a 左)。その後、外出流と東京湾海風の収束線は、全体的に南東へ移動するが、都市のバッファ効果によって都心上で強い降雨域が停滞し大雨をもたらす (13:40-50; 第9図 b, c 左)。一方、「都市 Old」では、外出流と海風の収束線で降雨はあるものの、その強度は弱く、降雨域も東京湾寄りになっている。これらの結果は、外部発生した大きなメソ降雨系が都市を通過する際に、バッファ効果によって降雨が強化されることを示している。

他の豪雨事例においても、2.4で述べた都市のバッファ効果によって豪雨フロントの進行が停滞・遅延されると解釈すると、理解しやすい場合が多い。

3. 豪雨対策～分布型流出モデルによる評価

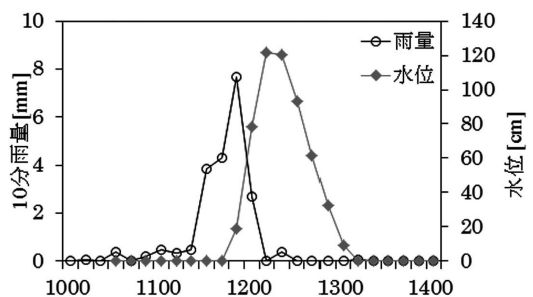
都市域に降った雨は、コンクリートやアスファルトなどで浸透面が少ないため、少雨時では、多くが下水道網に流れ込み、我々の糞尿と一緒に下水処理場で処理される。しかし、豪雨の場合は、流出量が多いため、下水管の余水吐を超越して直接都市河川に流れこみ (合流式下水道の場合)、一気にその水位を上げて危険である。また、都市河川の水位が上がって下水管の水が吐けなくなれば、マンホールから逆流すると

いった TV でおなじみの現象が起こる。第10図に、東京都呑川の豪雨時における、降雨と水位の時間変化を例示した (2007年6月10日)。降雨・水位データは東京都建設局の測定値であり、水位は大田区池上、降雨は呑川流域内8地点の平均値である。数 cm ほどでしかなかった水位は、降雨が開始してわずか30分で子どもの背丈ほどの120 cm に達し、さらに30分後には、何事もなかったかのようにもとの水位に戻っている。

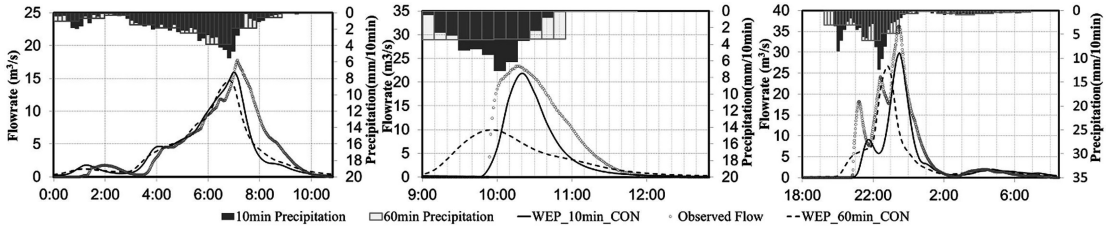
このような河川出水は、分布型流出モデルと呼ばれる水文モデルで再現される。分布型流出モデルは、詳細な土地被覆面 (浸透能) の情報と同時に、当然のことながら、入力として降雨の詳細な時空間分布を要求する。分布型流出モデルの1つである WEP (Jia *et al.* 2001) による呑川出水のシミュレーション例を第11図に示す。流出モデルの時間解像度を10分以下にすることによってようやく都市河川特有の早い出水が、それなりに再現されてくる。WEP の入力降雨に実況降雨を与える場合には、Ku レーダなど高い時空間解像度を有する降雨レーダを利用すること、予測降雨を与える場合には、気象モデルの時空間解像度を向上させることはもちろん、それと同時に都市効果のモデリングを洗練させて局地豪雨の予測精度を向上させていく必要がある。

都市域における豪雨対策の基本は、浸透面を増やし、土壌の貯水能力を高め、出水を遅らせることに尽きる。

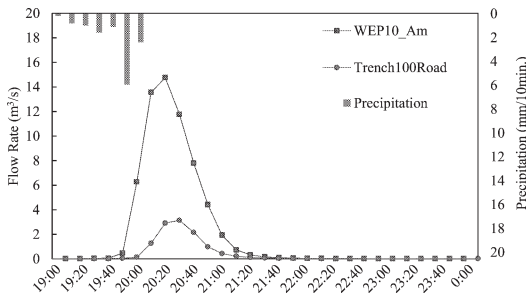
環状7号線地下の大調整池の完成によって神田川周辺の洪水を劇的に減少させていることは広く知られているが、このような大規模土木工事が難しい場合、道路下に浸透トレンチを埋設したり、透水性舗装を導入したり、各家庭に雨水浸透枳を設置したり、学校の校庭や駐車場などのオープンスペースを豪雨時に雨水調



第10図 東京呑川における雨量と水位の時間変化。



第11図 WEPモデルによる呑川における流出の再現(左から, May 20 2008; July 8 2008; August 30 2008). 丸: 実測, 実線: 10 min 解像度の計算結果, 点線: 60 min 解像度の結果.



第12図 浸透トレンチ・透水性舗装を呑川流域の全道路面に導入した場合の効果. 四角: 現在の流出ハイドログラフ, 丸: 対策後の流出ハイドログラフ.

整池として利用する, などなどの対処方法に迫られる. 第12図は, WEPを利用して呑川流域の路面に浸透トレンチと透水性舗装を導入した場合のシミュレーション結果を示している. 全道路面に2つの対策を併用出来れば(このシナリオ自体は非現実であるが), ピーク流出は現状の20%にまで抑えられる.

4. 今後の課題の整理

4.1 フィードバックパラメタリゼーション

都市気象の再現性を高めていくには, メソ気象モデルと建築土木分野のCFDモデルをうまく連携していくことが必要不可欠である.

メソ気象モデルに個々の建物群の影響を取り入れる手法として, (1)気象モデルと建物解像CFDの基礎方程式や解法アルゴリズムの垣根を外して共通化し, それによってシームレスなネスティングを行う直接的アプローチ, (2)街区単位の建築解像LESの詳細な結果に基づいて気象モデルに必要な新しいパラメタリゼーションを行い, 逆にメソ気象モデルの結果は擾乱成分を人為的に付加した上でLESの境界条件を供する間接的アプローチ, がある.

4.2 都市計画分野(街づくり)との連携

都市豪雨への防災対策は, 地域の土地利用と密接に関連しており, 第3章で紹介したような対処療法を別にすれば, 本来, 長期的な視点に立った都市計画(街づくり)の視点が不可欠である. 既に, 他の先進国と同様, ゼロ成長期に突入した自分達の街を, 将来どうしたいのか, 緑地・公園やプロムナードなどを生活圏にどう位置づけるのか, 行政・専門家・市民による協働がよりいっそう重要となるであろう.

参考文献

- Bornstein, R. and Q. Lin, 2000: Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies. *Atmos. Environ.*, **34**, 507-516.
- Fujibe F., 1987: Weekday-weekend differences of urban climates Part 1: Temporal variation of air temperature and other meteorological parameters in the central part of Tokyo. *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 923-929.
- 藤部文昭, 1998: 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.
- 藤部文昭, 坂上公平, 中鉢幸悦, 山下浩史, 2002: 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*, **49**, 395-405.
- Fujibe, F., H. Togawa and M. Sakata, 2009: Long-term change and spatial anomaly of warm season afternoon precipitation in Tokyo. *SOLA*, **5**, 17-20.
- Jia, Y., G. Ni, Y. Kawahara and T. Suetsugi, 2001: Development of WEP model and its application to an urban watershed. *Hydrol. Process.*, **15**, 2175-2194.
- Kanda, M., 2007: Progress in urban meteorology: A review. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85B**, 363-383.
- 神田 学, 2009: WRFの都市気象研究への応用. *ながれ*, **28**, 21-28.
- 日下博幸, 2009: 領域気象モデルWRFについて. *ながれ*, **28**, 3-12.
- Kusaka, H., F. Kimura, H. Hirakuchi and M. Mizutori,

- 2000: The effects of land-use alteration on the sea breeze and daytime heat island in the Tokyo metropolitan area. *J. Meteor. Soc. Japan*, **78**, 405-420.
- Kusaka, H., H. Kondo, Y. Kikegawa and F. Kimura, 2001: A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models. *Bound.-Layer Meteor.*, **101**, 329-358.
- Kusaka, H., F. Kimura, K. Nawata, T. Hanyu and Y. Miya, 2009: The chink in the armor: Questioning the reliability of conventional sensitivity experiments in determining urban effects on precipitation patterns. *Proceedings of the 7th International Conference on Urban Climate, Yokohama*, B12-2.
- Macdonald, R. W., R. F. Griffiths and D. J. Hall, 1998: An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmos. Environ.*, **32**, 1857-1864.
- Matheson, M. A. and Y. Ashie, 2008: The effect of changes of urban surfaces on rainfall phenomenon as determined by a non-hydrostatic mesoscale model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **86**, 733-751.
- Moriwaki, R., M. Kanda, H. Senoo, A. Hagishima and T. Kinouchi, 2008: Anthropogenic water vapor emissions in Tokyo. *Water Resour. Res.*, **44**, W11424, doi: 10.1029/2007WR006624.
- 中西幹郎, 原 由紀男, 2003: 東京都市部に短時間強雨をもたらした降水系の降雨強化に結びつく局地風の特徴. *天気*, **50**, 91-102.
- 妹尾泰史, 神田 学, 木内 豪, 萩島 理, 2004: 潜熱割合を考慮した人工排熱時空間分布の推計と局地気象に対する影響. *水工学論文集*, **48**, 169-174.
- 下重 亮, 仲吉信人, 神田 学, 2009: 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. *水工学論文集*, **53**, 277-282.
- 下重 亮, 仲吉信人, 神田 学, 2010: 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. *水工学論文集*, **54**, 349-354.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. B. J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang and J. G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF Version 3. *NCAR/TN-475+STR*, 126pp.
- 高橋日出男, 中村康子, 鈴木博人, 2011: 東京都区部における強雨頻度分布と建築物高度の空間構造との関係. *地学雑誌*, **120**, 359-381.
- Yonetani, T., 1982: Increase in number of days with heavy precipitation in Tokyo urban area. *J. Appl. Meteor.*, **21**, 1466-1471.
- Yoshikado, H., 1992: Numerical study of the daytime urban effect and its interaction with the sea breeze. *J. Appl. Meteor.*, **31**, 1146-1164.