

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

A NUMERICAL SIMULATION OF A LOCALIZED HEAVY RAINFALL IN FUKUKA METROPOLITAN AREA

久田由紀子¹・戸高心平²・松永信博³・上地孝佳²

Yukiko HISADA, Shinpei TODAKA, Nobuhiro MATSUNAGA and Takayoshi UECHI

¹正会員 博(工) 九州大学学術研究員 大学院総合理工学研究院
(〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1)

²学生会員 九州大学大学院 総合理工学府大気海洋環境システム学専攻
(〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1)

³フェロー会員 工博 九州大学教授 大学院総合理工学研究院
(〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1)

Localized heavy rainfalls in the summer season are often occurring in Japanese megacities and the occurrence frequency is recently increasing. It is considered that the increase may be strongly dependent on the urban heating phenomena. The localized heavy rainfall which occurred in Fukuoka city on 8 August, 2008 has been analyzed numerically by using the Weather Research and Forecasting model (WRFV3.0). The numerical analysis has been also carried out for the hypothetical case where Fukuoka metropolitan area was replaced by grass lands. The region of precipitation obtained by the analysis for the real situation agrees well with the observed one. The comparison between the real and hypothetical cases gives the conclusion that the existence of Fukuoka metropolitan area plays an important role for the occurrence of localized heavy rainfalls.

Key Words : WRF, urban climate, heavy rain, urbanization, Fukuoka

1. はじめに

近年、日本の都市において、しばしば短時間に局地的な豪雨が発生する。これは、「都市型集中豪雨」と呼ばれ、1時間雨量が100mmを超える場合もあり、地下の浸水や河川の氾濫、交通網の麻痺などの都市災害を引き起こす。特に、人口密度の高い大都市圏では、豪雨の規模も大きくなり、その災害の規模も甚大となる。

都市域では、都市の発展に伴う土地被覆の変化、エネルギー消費量の増大、建造物の増加の影響などにより高温化するヒートアイランド現象が年々顕著になっている。現在、都市型集中豪雨は、都市形成に伴うヒートアイランド現象と密接に関係していると推測されている。Bornstein et al.¹⁾は、アトランタ都市圏で気象観測を行い、高温化した地域において地上風が収束することにより降水系が発達し、局地的集中豪雨が発生することを指摘した。藤部ら²⁾は、首都圏の広範囲にわたる昇温が地上風の都市域への収束を強め、局地的豪雨の発達を引き起こ

す可能性を示唆した。これら2つの研究は、定点観測で得られた気象データを基にした統計解析により行われているが、ごく狭い範囲で発生する短期的な集中豪雨の発生原因や詳細な構造を解明する上では、密度高い定点観測が必要となる。

近年では気象モデルを用いた数値解析が盛んに行われている。伊藤ら³⁾は、都市環境を構成する土地被覆、人工排熱、建物分布の3つの要素に着目し、それぞれの要素が生み出す熱的效果、力学的効果が降水に影響を与えることを明らかにした。下重ら⁴⁾は、ゼロ面変位を用いて都市の幾何形状を詳細に再現することにより、都市幾何形状が局地的豪雨の発生に影響を与えることを示唆した。日下ら⁵⁾は、都市が降雨に及ぼす影響を評価する新しい手法を提案している。この様に我が国において、都市型集中豪雨の解明に取り組んだ研究は数多く行われている。しかしながら、これまでの研究では、首都圏での事例を対象とした研究がほとんどであり、都市規模が大きく異なるその他の中小都市を対象とした研究はほとんど行われていないのが実情である。

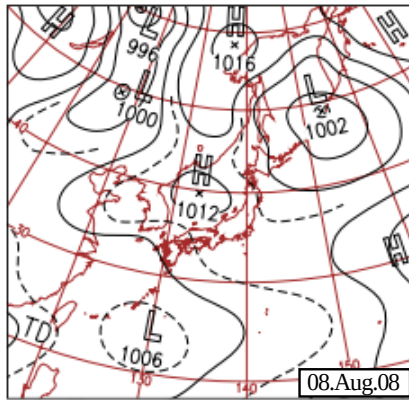


図-1 2008年8月8日9時の地上天気図

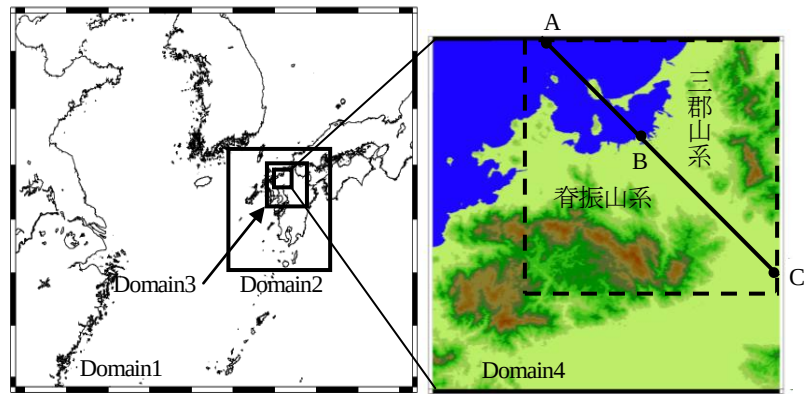
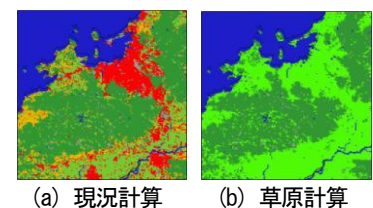


図-2 計算領域 (Domain4の図に示す実線ABC, 及び点線で囲まれた領域は鉛直断面, 水平分布の解析にそれぞれ用いる)

表-1 計算条件

Domain	1	2	3	4
ドメイン幅(km)	1790.1×1530.9	440.1×477.9	191.7×197.1	56.7×56.7
格子幅(km)	8.1	2.7	0.9	0.3
格子数	221×189	163×177	213×219	189×189
タイムステップ(sec)	45	15	5	1.25
土地利用データ	landuse_2min	landuse_30sec	Jland_100m	
標高データ	topo_2min	topo_30sec	Jtopo_50m	
提供元	NCEP		国土地理院	
初期・境界条件データ	NCEP FNL Global Analyses (解像度 1 度)			
Microphysics	WSM 6-class scheme			
Longwave Radiation	Rapid Radiative Transfer Model			
Shortwave Radiation	Dudhia Scheme			
Land Surface Model	Noah Land Surface Model-Urban Canopy Model			
Planetary Boundary Layer	YSU scheme			



- Urban and built-up land
- Dryland Cropland and Pasture
- Irrigated Cropland and Pasture
- Grassland
- Mixed Sfrubland/Glassland
- Mixed Forest
- Water Bodies
- Barren or Sparsely Vegetated

図-3 Domain4の土地利用分布

福岡都市圏の北部は玄界灘に面しており、東部は三郡山系、南部は背振山系に囲まれていることにより、夏季の晴天時には安定した海風が発生し、内陸域にまで侵入する。久田ら⁹⁾は、福岡都市圏で発生するヒートアイランド現象によって日中の都市域上空では対流活動が活発化することを指摘した。首都圏とは都市の規模や周辺の環境が異なるが、福岡都市圏においても都市の存在が豪雨発生に影響を及ぼしている可能性は高いと考えられる。

本研究では、福岡都市圏で夏季に発生する局地的豪雨の発生要因を明らかにすること、首都圏における事例との違いを明らかにすることを目的として、メソ気象モデルWeather Research and Forecasting Model (WRFV3.0)を用いて、2008年8月8日に福岡都市圏を中心として発生した局地的豪雨のシミュレーションを行った。さらに都市域を草原に置き換えることにより仮想シミュレーションを行い、現況シミュレーションとの比較から福岡都市圏の存在が局地的豪雨に与える影響を調べた。

2. 計算概要

(1) 対象事例の概要

解析は、2008年8月8日に福岡都市圏において発生した局地的豪雨を対象とする。図-1に対象日の地上天気図を示す。東・北日本は高気圧におおわれており晴天であったが、西日本では、南海上の低気圧の影響により暖かく湿った空気が流れ込んでいた。福岡では午前中、東寄りの風が卓越していたが、午後には海風の侵入がみられており、最高気温は35.8度を観測した。都市域の昇温により、安定した熱的循環が形成されていたと推測される。

降雨は15時に開始しており、博多AMeDASでは降雨開始後の1時間に62.5mmの雨量を観測した。その後は、1時間に数mm程度の雨量を観測した。また、博多AMeDASから5km程度東の位置にある福岡管区气象台での観測値は17mmであり、大きな差がある。これらのことから、本現象は非常に局地的で短時間に発生した降雨と考えられる。

(2) 計算条件

計算はメソ気象モデルWeather Research and Forecasting Model (WRFV3.0)を用いて行った。WRFにはUrban

canopy model (kusaka et al.⁷⁾)というオプションがあり、これを選択することにより都市域における建造物や人工排熱の影響を再現することができる。人工排熱に関しては資源エネルギー庁による都道府県別エネルギー消費統計の福岡県のデータ⁸⁾から、Lin et al.⁹⁾と同様の計算方法を用いて算出した。また、人工排熱は時間変化を考慮しており、最大値を 40W/m^2 となるように設定した。計算条件を表-1に、計算領域を図-2に示す。土地利用データは、Domain1, 2とDomain3, 4にて異なるデータを使用しているが、解像度が異なるのみで土地利用区分、分布ともに同様のものである。計算期間は助走期間を考慮し、降雨の始まる約30時間前に当たる2008年8月7日9時から開始し、8月8日21時までの36時間に設定した。Domain1から4における計算タイムステップは、それぞれ45, 15, 5, 1.25s に設定した。また、降雨に対する都市の影響を明らかにするため、図-3(b)に示すように、都市域を草原に置き換えた仮想数値実験を行った。本論文では通常の計算結果を現況計算、都市を草原に置き換えた計算結果を仮想計算と呼ぶ。

3. 計算結果及び考察

(1) 降雨及び風系の平面分布

図-4に15～16時におけるレーダーアメダス解析値による1時間積算雨量の分布を示す。これは、博多AMeDASにおける1時間積算雨量が最大となった時刻である。図-5(a), (b)に、それぞれ現況計算と仮想計算で得られた雨量分布を示す。現況計算では14～15時、仮想計算は13時30分～14時30分における1時間積算雨量を示す。図-4で示したレーダーアメダス解析値と図-5(a)で示した現況計算との間には1時間のずれがあるが、現況計算では実際より1時間早く降雨が発生したため、この時刻を解析対象とする。ここで、1時間のずれはあるが、高層気象や福岡管区気象台での観測値との比較では高い精度で再現できていること、また強い降雨が発生した場所と雨量

がほぼ再現できていることから、この数値計算での再現性は十分であると考えられる。次に、図-5(a)で示した現況計算と図-5(b)で示した仮想計算との間には30分のずれがあるが、仮想計算では現況計算より海風の進行速度が早い⁹⁾ため、強い降雨が発生した地域における海風と東からの風による収束も30分早く起こった。また、全体の風場を比較した場合も、30分前の方がほぼ同じ状態となるため、30分早い時間を解析に用いることとした。なお、これ以降の解析図では図-2中の点線で囲まれた福岡都市圏を中心とした領域のみを示す。

図-4と図-5(a)から、現況計算ではレーダーアメダス解析値より、強い降雨域はやや狭く南にずれているが、概ね一致している。また、図-5(b)より仮想計算では都市域における降雨は発生していない。南の端に降雨が確認できるが、これは福岡平野の南側にある脊振山系上であることから、地形の影響を受けて発生した降雨だと考えられる。

図-6(a), (b)に地表10mにおける水平風速と高度2000mにおける鉛直風速の分布の時間変化を示す。図-7(a), (b)に10分間積算雨量の時間変化を示す。(a), (b)はそれぞれ現況計算、仮想計算である。また、それぞれにおいて、13時(仮想計算では12時30分。以下、括弧内は仮想計算の時刻とする。)、14時(13時30分)、14時20分(13時50分)の図を示す。13時(12時30分)は、降雨発生前であり、14時(13時30分)は降雨開始直後、14時20分(13時50分)は現況計算において10分間積算雨量が最も大きくなった時刻である。

13時(12時30分)では、図-6(a), (b)から、東寄りの風、南寄りの風、そして北からの海風が都市圏へ流入していることがわかる。現況計算では海風の侵入により、都市域での対流が活発化していることがわかるが、仮想計算では現況計算に比べ強い対流は発生していない。図-7(a), (b)より都市域における強い降雨分布は両ケース共にみられない。しかし、都市の東側では、降雨域に違いがあるが、どちらのケースでも降雨がみられる。これは福岡平野の東側にある三郡山系の影響により発生した降

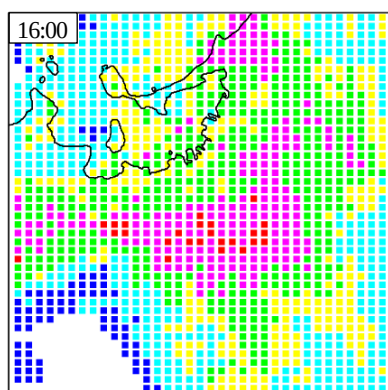
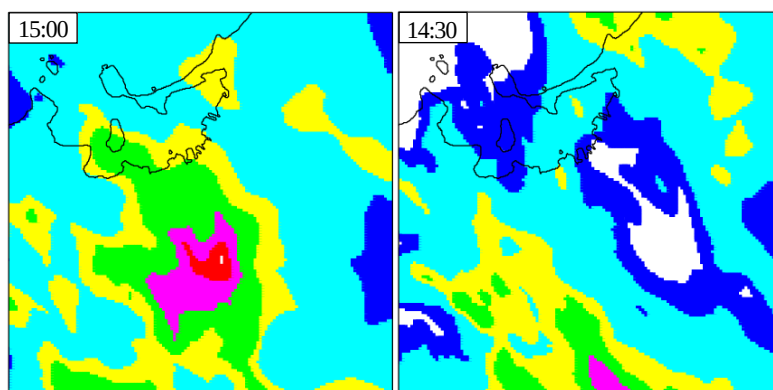


図-4 2008年8月8日16時のレーダーアメダス解析雨量の分布



(a) 現況計算

(b) 仮想計算

図-5 1時間積算雨量の分布

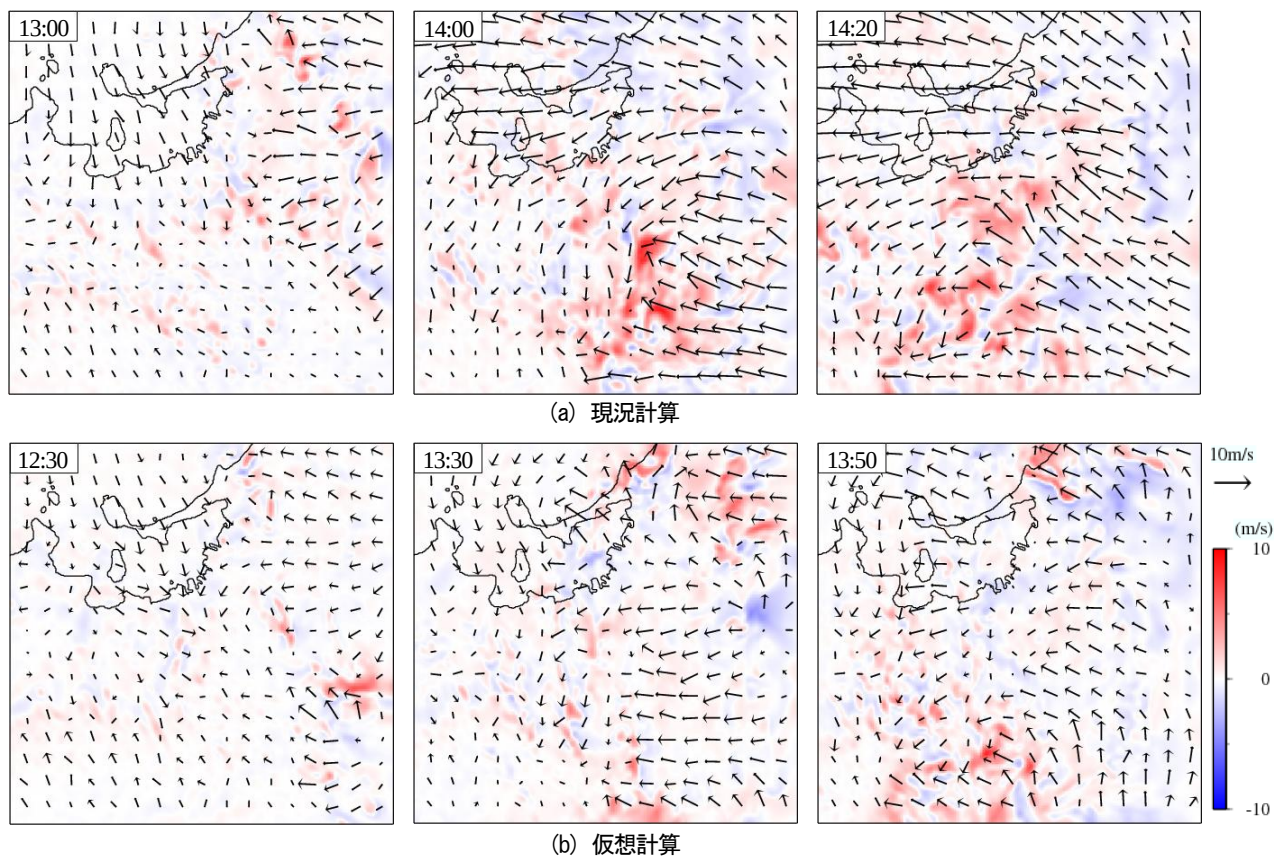


図-6 地表10mの水平風速（ベクトル）と高度2000mの鉛直風速（カラーコンター）の分布

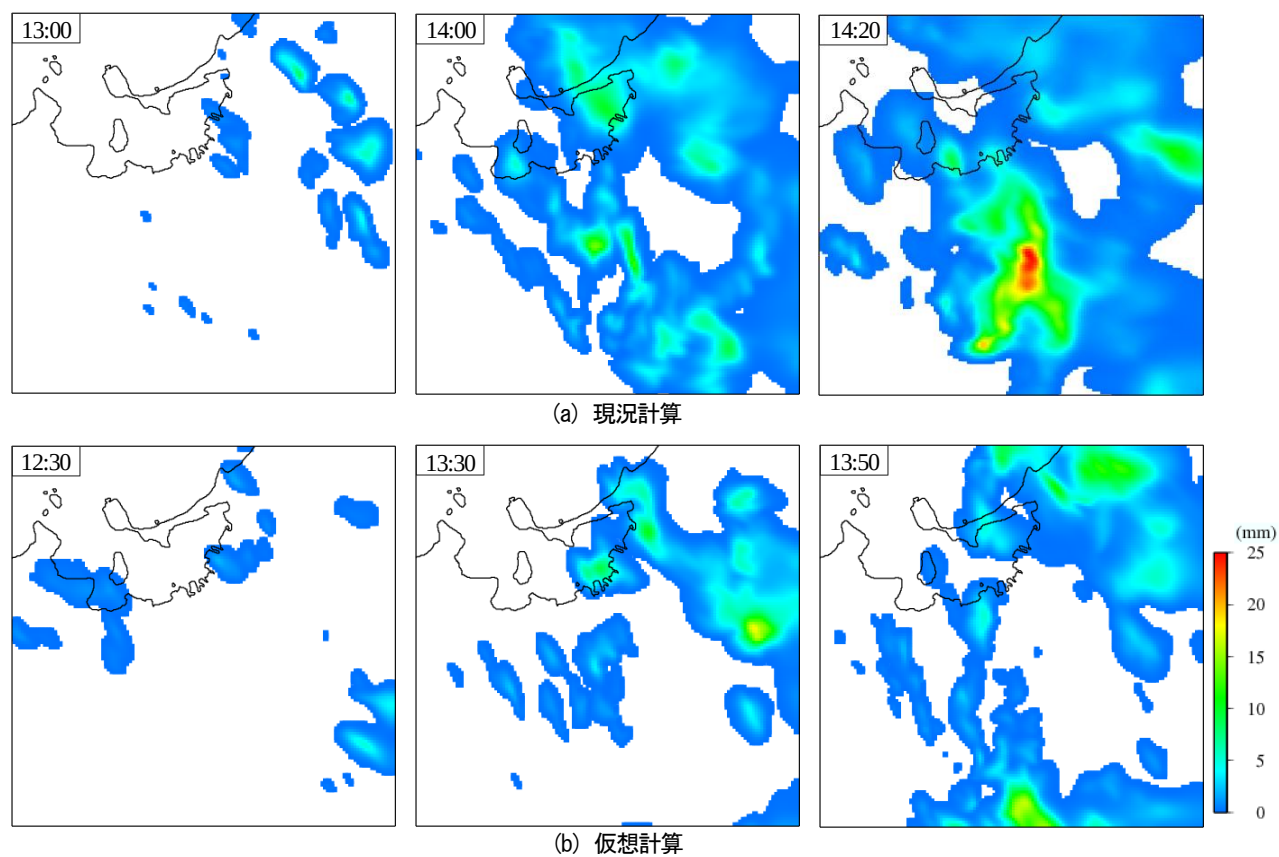


図-7 10分間積算雨量の分布

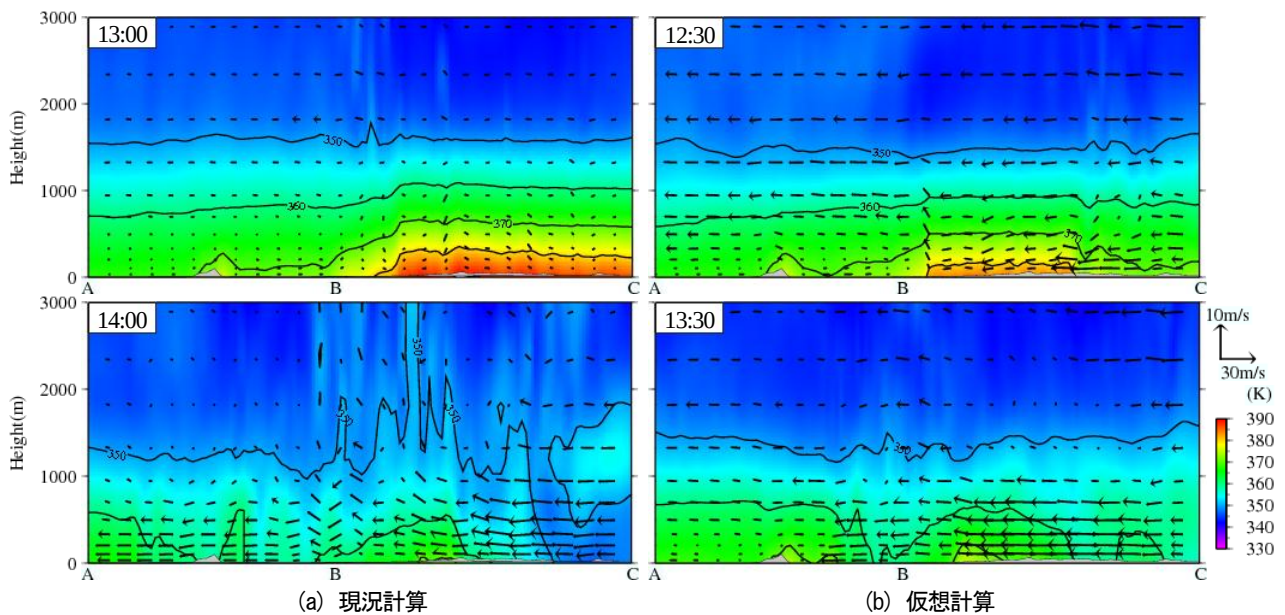


図-8 鉛直断面における相当温位(カラーコンター)と風速(ベクトル)の分布

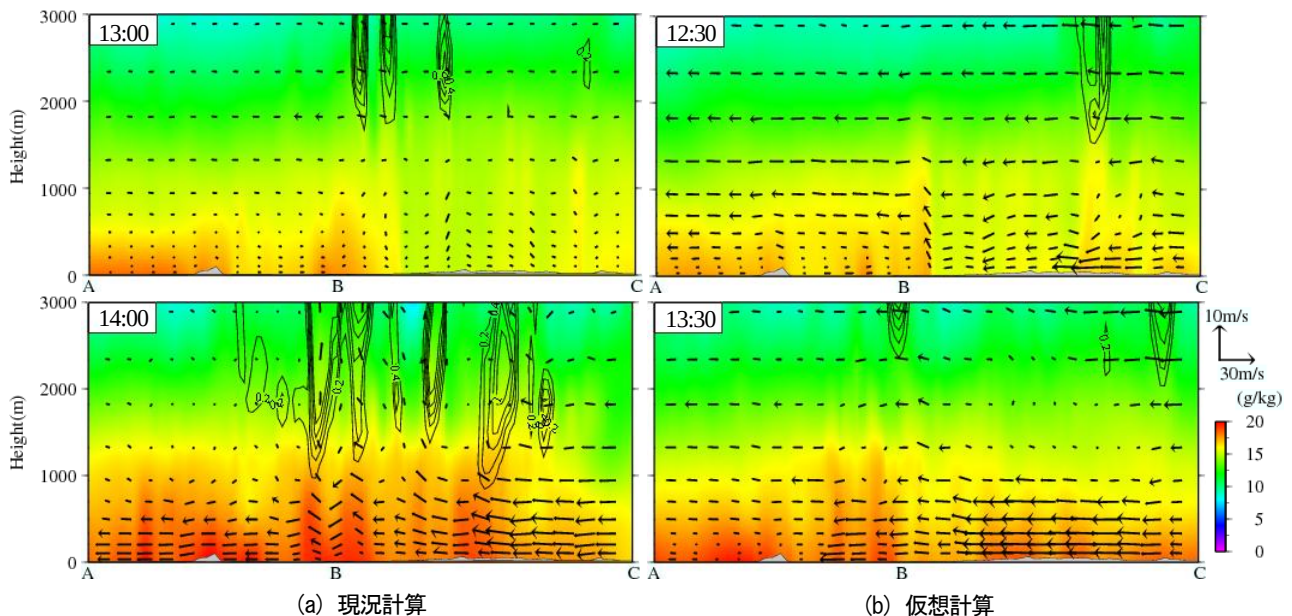


図-9 鉛直断面における混合比(カラーコンター)、雲水混合比(等値線)、風速(ベクトル)の分布

雨だと考えられる。

14時(13時30分)には、図-6(a),(b)から、現実計算では海風が都市域南部に到達しているが、東寄りの風も都市域にせまっている。南部では海風と東寄りの風が収束し、現実計算では強い上昇流が発生していることがわかる。仮想計算でも同様の風系となるが、都市域では強い上昇流は発生していない。図-7(a),(b)より、現実計算では都市域において降雨が発生しているのがわかる。仮想計算でも降雨は発生しているが、現実計算に比べ降雨強度は弱く、狭い領域に限られている。

14時20分(13時50分)では、図-6(a),(b)から、両ケースとも南部では上昇流が発達しているが、都市域に強い上昇流がみられるのは現実計算のみであることがわかる。図-7(a),(b)より現実計算の方で都市南部に強い降雨が表れている。仮想計算では都市域に弱い降雨がみられ、

また都市の南側にやや強い降雨が存在している。この南側の降雨は、南寄りの風とともにこの地点に到達しており、脊振山系の影響を受け発生したものであると考えられる。

(2) 相当温位、水蒸気混合比、雲水混合比の鉛直断面分布

ラインABC上における相当温位、風向風速の断面分布を図-8(a),(b)に、水蒸気混合比、雲水混合比、風向風速の断面分布を図-9(a),(b)に示す。ラインABCの位置は図-2に示す。点Bは海岸線であり、陸域がラインBC上である。13時(12時30分)には、図-8(a),(b)から、現実計算では陸域の地表面付近における温位は高く385K程度となっており、仮想計算では380K程度である。この5K程度の違いが都市の存在による差であり、現実計

算における対流を強化していると考えられる。なお、仮想計算においてC点近傍の温位が急激に低くなっているが、降雨により気温が低下したと考えられる。図-9(a), (b)の水蒸気混合比の分布から、両ケースとも都市域に湿った海風が侵入しているのがわかる。

14時(13時30分)には、図-8(a), (b)から、両ケースとも降雨により都市域全体の気温が低下している。現況計算では上空の温位が不安定になっており、下部から大量の水分を含んだ大気が上昇することによって、図-9(a)に見られる雲が多数形成されている。仮想計算では、大気の状態の変化はあまりない。混合比は1時間前に比べ高い分布になっているにもかかわらず、雲はほとんど形成されていない。

久田ら⁶⁾は、夏季の福岡市では午後に海風の侵入により海風フロントが形成されること、また都市域での昇温により内陸部では対流が活発になること指摘している。本事例においても海岸から離れた内陸部において強い上昇流が発達しており、福岡都市圏での対流活動の特性をよくとらえているといえる。

首都圏の事例と比較すると、首都圏においても藤部ら²⁾、下重³⁾らは海風の内陸部への侵入、及び収束による上昇流の発生が降雨に影響することを指摘しており、本事例も同様の結果であることから、海風の収束が沿岸都市における降雨の形成、発達過程における特性であるといえる。しかし、首都圏での事例は二方向から侵入した海風が収束する事例が多いが、福岡都市圏では海風は一方からのみ侵入しており、対象とした事例では東よりの風との収束により、上昇流が発生したという点で首都圏とは異なる降雨の発生過程を示している。また福岡平野は東部、南部を山系に囲まれているので、内陸部に流入した海風が収束し、対流活動を活発化していると考えられる。これらのことから、首都圏と福岡都市圏での降雨はともに都市の昇温による海風の収束、対流強化が要因の一つとなっているが、海風の収束する過程は異なるものであると考えられる。

4. おわりに

メソ気象モデルWRFを使用したシミュレーションの結果から以下のことがわかった。

(1)現在の都市の状態を再現して行った数値シミュレーションでは、レーダーアメダス解析値と同程度の降雨を再現することができた。強雨が発生した地点では、北からの海風と東からの風の収束がみられた。しかし、降雨開始時刻に関しては1時間程度早く、今後の課題である。

(2)都市を草原に置き換えた仮想シミュレーションでは、都市域における強雨は発生しなかった。都市域が昇温しなかったことにより、上空での対流活動が活発化しなかったためと考えられる。

(3)福岡都市圏における局地的集中豪雨は首都圏での豪雨事例同様に海風の収束が一つの要因として考えられるが、海風の収束する過程に異なる点がみられた。

これらの結果から、夏季の福岡都市圏において発生する局地的豪雨は、都市のヒートアイランド現象による海風の収束、対流の強化が関係していることが示された。今後は、他のいくつかの事例でも同様の数値シミュレーションを行い、検討する。

謝辞：本研究は、九州建設救済会研究助成事業の援助のもとで行われたことを示す。

参考文献

- 1) Bomstein, R and Lin, Q.: Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies, *Atmospheric Environment*, 34, pp507-516, 2000.
- 2) 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期時間強雨に先立つ地上風系の特徴, *天気*, Vol.49, pp395-405, 2002.
- 3) 伊藤洋太郎, 茂木耕作, 相馬一義, 萬和明, 田中賢治, 池淵周一: 都市環境が都市型集中豪雨に及ぼす影響の評価, 京都大学防災研究所年報, 第50号, pp715-722, 2006.
- 4) 下重亮, 住吉信人, 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に及ぼす影響, *水工学論文集*, 第53巻, pp277-282, 2009.
- 5) 日下博幸, 羽入拓朗, 原政之, 木村富士男, 片岡久美, 足立幸穂: 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, pp96, 2009.
- 6) 久田由紀子, 上地孝佳, 松永信博: 福岡都市圏の海風進入特性と土地利用形態の関係, *環境システム研究論文集*, vol.33, pp105-112, 2009.
- 7) Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y. and Kimura, F.: A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab model, *Boundary-Layer Meteorology*, vol.101, pp329-358, 2001.
- 8) 資源エネルギー庁HP, <http://www.enecho.meti.go.jp/>
- 9) Lin, C.-Y., F. Chen, J. C. Huang, W.-C. Chen, Y.-A. Liou, W.-N. Chen, S.-C. Liu.: Urban Heat Island effect and its impact on boundary layer development and land-sea circulation over northern Taiwan, *Atmospheric Environment*, 42, pp5635-5649, 2008.

(2009. 9. 30受付)