

# 人工排熱を考慮した福岡都市圏の熱環境特性の解析

ANALYSIS OF THERMAL ENVIRONMENT CHARACTERISTICS OF  
FUKUOKA URBAN AREA BY CONSIDERING ANTHROPOGENIC HEAT

久田 由紀子<sup>1</sup>・小野 恭平<sup>2</sup>・松永 信博<sup>3</sup>・池畑 義人<sup>4</sup>

Yukiko HISADA, Kyouhei ONO, Nobuhiro MATSUNAGA and Yoshito IKEHATA

- 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 （〒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）
- 4 正会員 博（理） 日本文理大学准教授 工学部建築学科 （〒870-0397 大分県大分市大字一木1727）

A numerical simulation was carried out to investigate temperature distribution on the Fukuoka urban area by using WRF model. In this simulation, the urban canopy effect and anthropogenic heat effect was considered. Amount of anthropogenic heat was determined by total energy consumption of Fukuoka city. The results were compared with the field data obtained in August 6, 2003, and the calculated results agreed well with the observed one. The characteristics of the heat island on the Fukuoka plain were made clear by the temperature distribution on the ground. The temperature of Fukuoka city at night rises with the increase of anthropogenic heat.

*Key Words : WRF , Heat Island , Fukuoka Urban Area , Urban Canopy Model , Anthropogenic Heat*

## 1. はじめに

福岡都市圏は、人口約150万人を有する九州最大の都市圏である。その中でも、天神・博多駅地区は、多くの商業施設が立ち並び、人口が集中する福岡都市圏の中心部である。その周辺には市街地が形成され、急激な都市化が進んでいる。都市化によって顕在化し、昨今問題となっているのがヒートアイランド現象である。ヒートアイランド現象とは、都市化による地表面被覆の人工化や、エネルギー消費に伴う人工排熱の増加により引き起こされる都市高温化現象である。猛暑や熱帯夜を引き起こすだけでなく、大気汚染や局地的豪雨をはじめとする異常気象を誘発するなど、様々な影響をもたらしている。

数値モデルを使用したヒートアイランド現象に関する研究は多く行われているが、都市熱環境特性を正確に再現する上で、未だ解決すべき多くの問題が残されている。そのひとつとして、人工排熱量を適切に与えることが重要な課題となっている。Kimuraら<sup>1)</sup>は、関東平野を対象に土地利用および人工排熱を考慮したケース、人工排熱と都市を排除したケースのシミュレーションを行い、日中における両者の気温差は1度であるとした。中嶋ら<sup>2)</sup>は

京阪神を対象にWeather Research and Forecasting(WRF)<sup>3)</sup>に都市キャノピーモデルを用い、人工排熱を与えたシミュレーションを行い、これまで数値計算モデルにおいて主流であったMM5と比較し、WRFがMM5と遜色のない精度であることを示した。Kusakaら<sup>4)</sup>は、WRFに都市キャノピーモデルを組み込み、関東都市圏の熱環境を再現した。Cuan-Yaoら<sup>5)</sup>は、人工密度とエネルギー消費量から人工排熱量を算出し、都市における気温のシミュレーションを行い、人工排熱がヒートアイランド強度を高めていることを示した。

本研究では、福岡市を対象として、WRFと都市キャノピーモデルオプションを用い人工排熱を与えて現況計算を行い、福岡都市圏における熱環境特性の再現を試みる。また、人工排熱が気温に及ぼす影響を検証するため、人工排熱量を変化させた3つのケースのシミュレーションを行う。

## 2. 計算概要

本研究で使用する気象解析モデルWRFは、米国国立環境予測センター(NCEP)をはじめとする複数の研究機

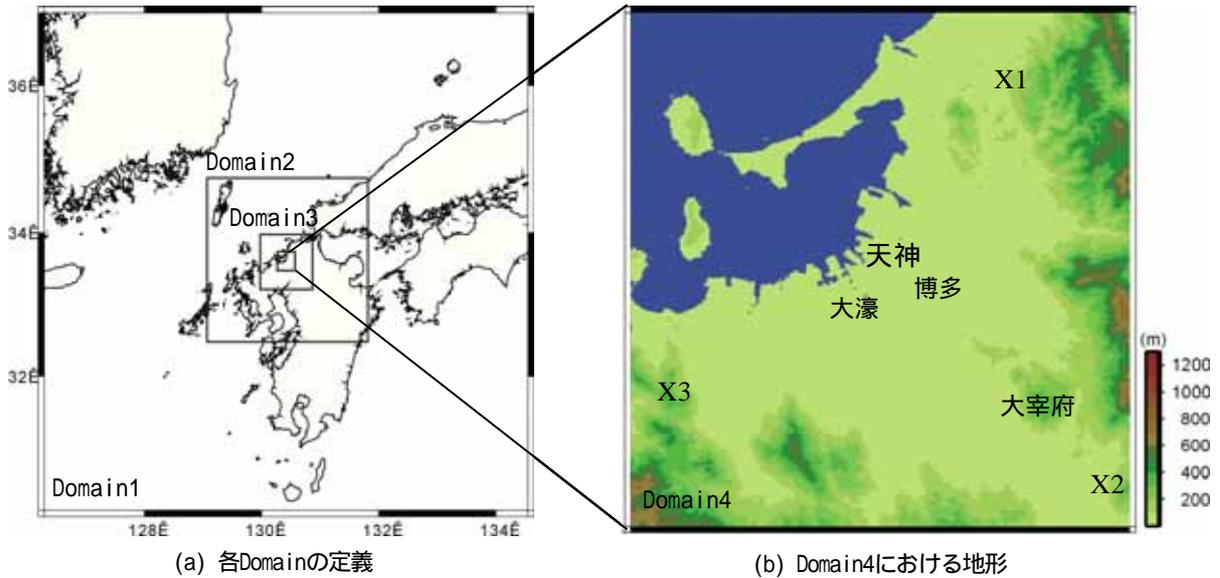


図-1 計算領域

表-1 計算条件

Domain	1	2	3	4
ドメイン幅 (km)	931.5	310.5	103.5	34.5
格子幅 (km)	13.5	4.5	1.5	0.5
格子数	69×69	69×69	69×69	69×69
タイムステップ (sec)	54	18	6	2
土地利用データ	landuse_2m	landuse_30s	Jland_100m	Jland_100m
標高データ	topo_2m	topo_30s	Jtopo_50m	Jtopo50m
提供元	NCEP		国土地理院	
初期・境界条件データ	FNL Global Analyses (NCEP 提供)			
Microphysics	WSM 6-class scheme			
Surface Layer scheme	Monin-Obukhov scheme			
Land Surface Model	Noah Land Surface Model-Urban Canopy Model			
Planetary Boundary Layer	YSU scheme			

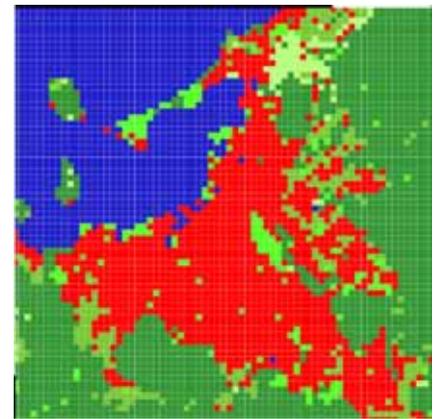


図-2 土地利用データ

関によって共同開発されたメソ気象モデルである。図-1に計算領域を示す。図-1(a)はDomain1から4までの計算領域を、図-1(b)はDomain4の地形を示している。図-1(b)に示す博多、天神周辺が、福岡都市圏の都心部である。X1、X2、X3の3地点はヒートアイランド強度<sup>6)</sup>の算出に用いる郊外の代表3地点とする。表-1には計算条件を示す。それぞれのDomainは全て福岡市(北緯33.6度、東経130.41度)が中心になるよう設定している。計算領域の長さはDomain1が931.5km、Domain2が310.5km、Domain3が103.5km、Domain4が34.5kmの正方形である。すべての計算領域は水平方向が69×69個の格子に、鉛直方向は27層に分割されている。水平方向の格子の幅は最も広いDomain1で13.5km、最も小さいDomain4で0.5kmである。土地利用と標高データについては、表-1に示すように、Domain1には米国地質調査所(USGS)から公表されている2分メッシュ値をDomain2には同じくUSGSから公表されている30秒メッシュ値を、Domain3およびDomain4には土地利用データとして1/10細分区画土地利

用データを、標高データとして数値地図50mメッシュ(いずれも国土地理院提供)をそれぞれ使用した。初期条件および境界条件には、NCEPから提供されているFNL Global Analysesデータを使用した。図-2は福岡都市圏における土地利用を示しており、赤い領域が都市部である。WRFには都市キャノピーオプションが組み込まれており、これにより人工排熱を与えることができる<sup>7)</sup>。本研究では、土地利用データにおいて都市部となる領域に人工排熱を与えた。現況計算では、人工排熱量は資源エネルギー庁の資料<sup>8)</sup>を参考にし、2003年の福岡市の産業、民生、運輸における総消費エネルギー量から算出した値17.1W/m<sup>2</sup>が日平均になるよう時間変化を考慮し、都市部にのみ与えた現況計算を行った。また、人工排熱量の違いによる気温の変化を比較検証するため、人工排熱を与えないケース、人工排熱量17.1W/m<sup>2</sup>を時間変化なしで都市部に一様に与えたケース、人工排熱量50W/m<sup>2</sup>を時間変化なしで都市部に一様に与えたケースの解析を行った。

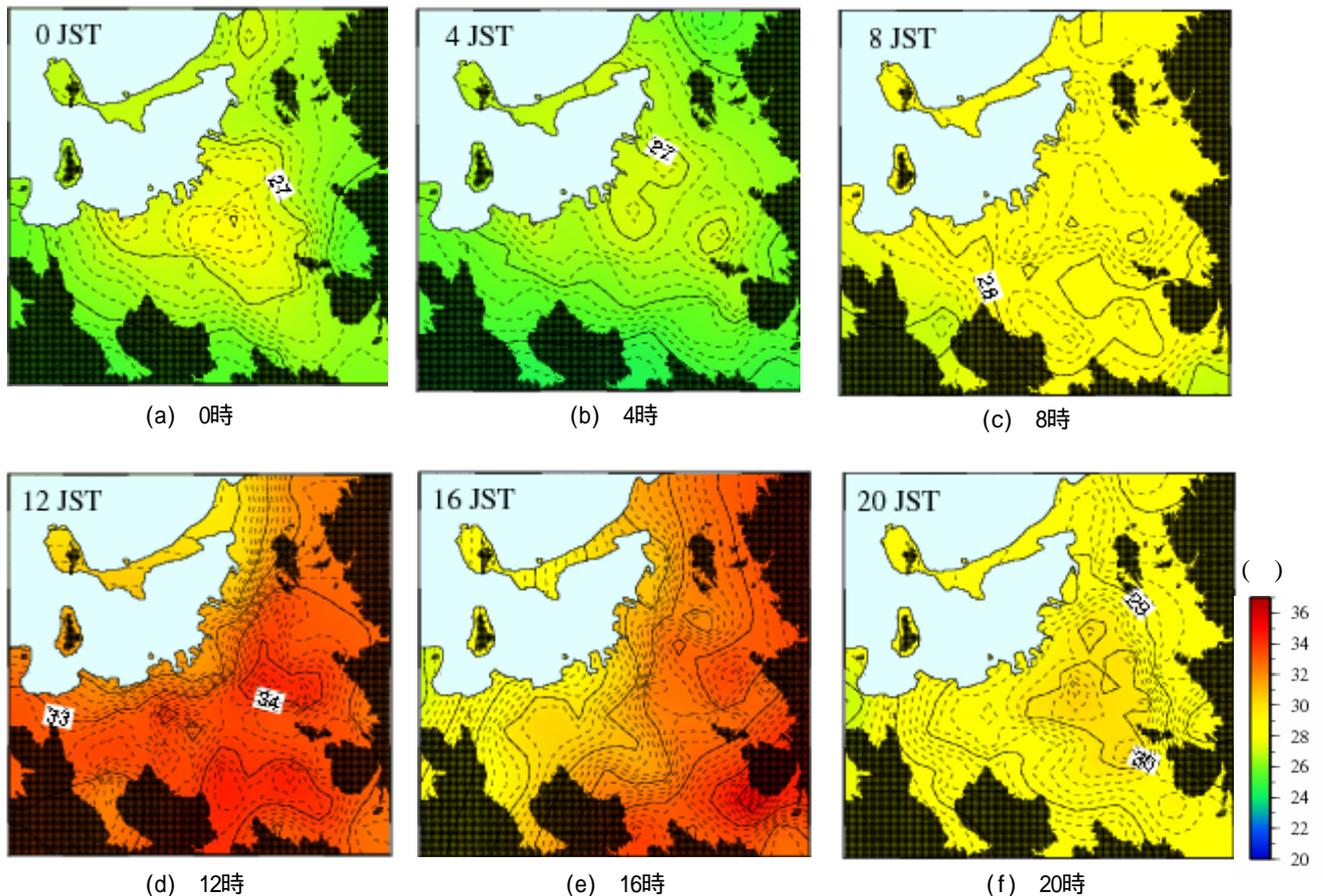


図-3 2003年8月6日の福岡都市圏における気温分布(観測結果)

解析対象の日として、ヒートアイランド現象が顕著であった2003年8月6日を選択した。計算の期間は助走時間(24時間)を含めて、2003年8月5日0JSTから2003年8月7日0JSTまでの48時間としている。

### 3. 解析結果

#### (1) 地上の気温分布

##### a) 観測結果

計算結果と比較するために、観測結果を図-3(a)～(f)に示す。これらのデータは久田らが行った2003年の観測<sup>9)</sup>に基づいており、2003年8月6日の福岡平野における気温分布の4時間毎の変化を示している。図-3(a)で示されるように、0時には都心部とその周辺が27を越える最も高温な地域となり、郊外へ向かうほど気温が低くなる。明瞭な同心円状の気温分布が形成されている。12時にはさらに気温が上昇し、海岸線に沿った地域を除いて福岡市の気温はほぼ一様に高温化している。

0時、4時、20時に見られる高温域は福岡都市圏の中心部と一致しており、同心円状のヒートアイランド現象が

確認できる。これは、郊外における放射冷却、山麓斜面を下る夜間冷気流および都市圏における排熱との相互作用によって形成されるものと思われる。また、日中は日射により福岡都市圏全域が高温になり、広範囲のヒートアイランド現象が確認できる。

##### b) 計算結果

図-4(a)～(f)に、計算結果から得られた2003年8月6日の高度1.5mにおける福岡平野の気温分布を4時間毎に示す。図-4(a)の0時は、27を越える高温域の範囲は図-3(a)と比較すると広範囲であるが、都市圏中心部が高温となり、郊外の気温が低くなっている。都市部と郊外の気温差から算出したヒートアイランド強度<sup>6)</sup>は3.2であり、明瞭なヒートアイランド現象が確認できる。4時には27を越える高温域は都心の僅かな部分を残すのみとなる。都市圏全域は25から26となっており、図-3(b)とほぼ同様の気温分布を示す。8時と12時には、福岡都市圏全体が日射により一様に高温化していることがわかる。12時においては、図-3(d)で示した海岸線に平行に等温線が並ぶ様子が再現されている。16時には、都市圏の東部は高温であるが、西部は気温が低下している。これは、海風侵入による気温上昇緩和効果のためであり、

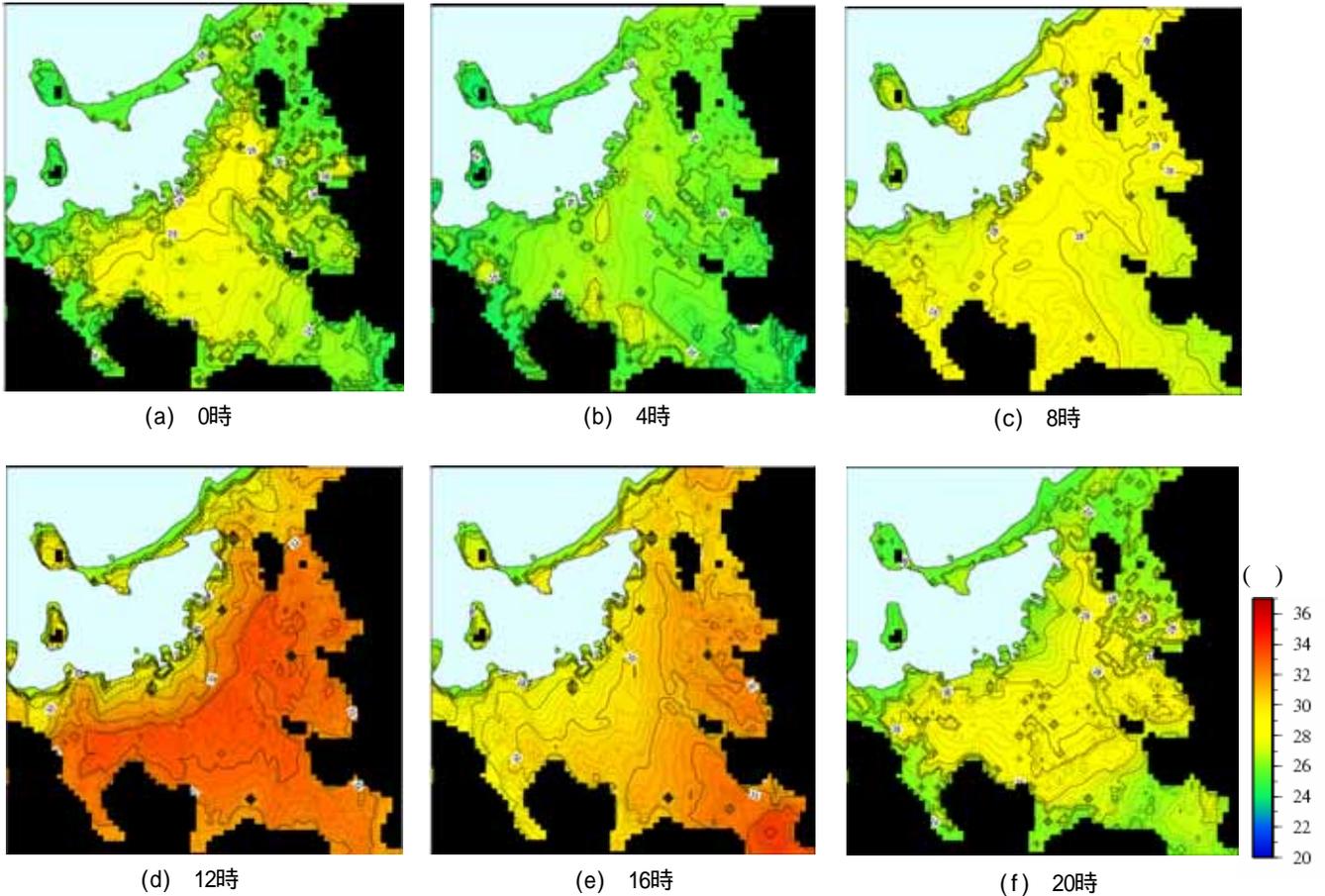


図-4 2003年8月6日の福岡都市圏における気温分布(計算結果)

計算結果は図-3(e)をよく再現している．図-4(f)では、図-3(f)と比べ、郊外における冷却は若干大きくなっているが、ヒートアイランド強度は1.2となっており、ヒートアイランド構造の形成開始を再現している．このように、図-3と図-4の比較から、今回人工排熱量を与えた気象モデルWRFによる解析は、福岡都市圏における熱環境特性をよく再現していると考えられる．

### (2) 計算の再現性の検証

図-5に、現況計算の結果と観測値の気温の比較を示す．観測値のデータは久田<sup>9)</sup>が福岡都市圏全域の71地点で観測した気温データである．比較に用いた値は、0時から12時までの一時間毎の値である．計算値と観測結果はよく適合しており、相関係数は0.91となっている．これらから、都市キャノピーを用い、人工排熱を用いた場合、福岡平野におけるWRFの気温の再現性は高く、本研究における排熱量の評価は妥当であると考えられる．

### (3) 排熱量の違いによる気温の時間変化の検証

人工排熱量の違いが気温に与える影響を検討するため、3段階の人工排熱量を与えた数値計算を行った．検証を

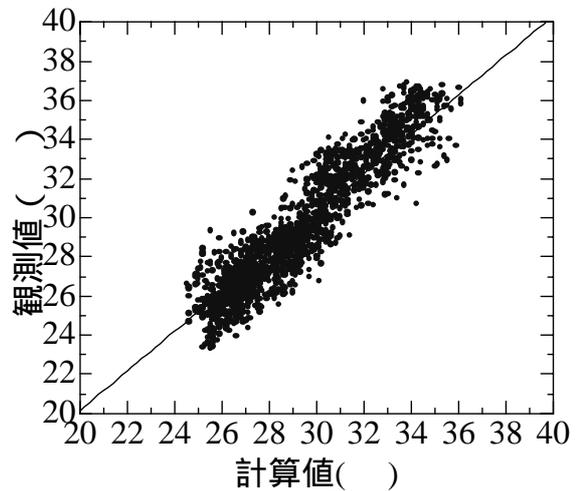


図-5 気温の観測値と計算値の比較

行うのは、人工排熱を与えない場合、人工排熱量  $17.1 \text{ W/m}^2$  を時間変化なしで都市部に一様に与えた場合、人工排熱量  $50 \text{ W/m}^2$  を時間変化なしで都市部に一様に与えた場合の3ケースと、排熱の時間変化を考慮し、日平均が  $17.1 \text{ W/m}^2$  となる現況計算である．図-6(a)～(d)はそれぞれ、図-1(b)に示す都市部である博多、大濠、大宰

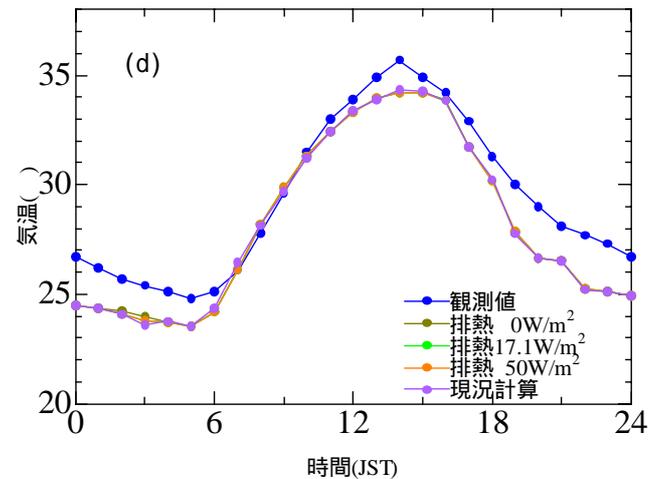
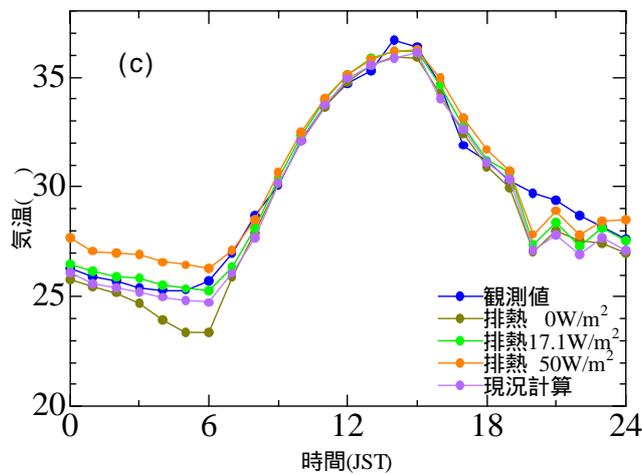
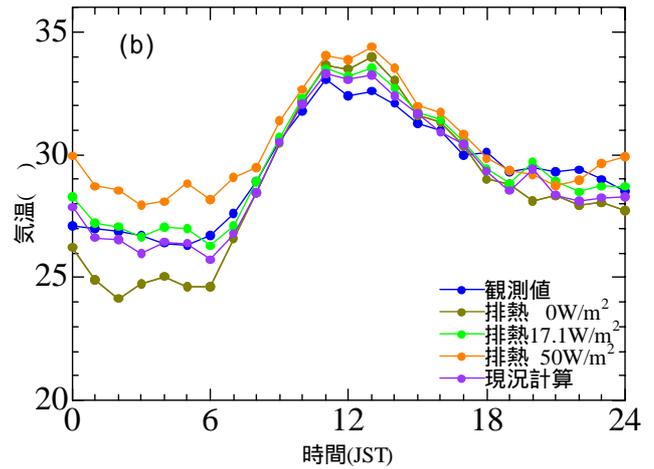
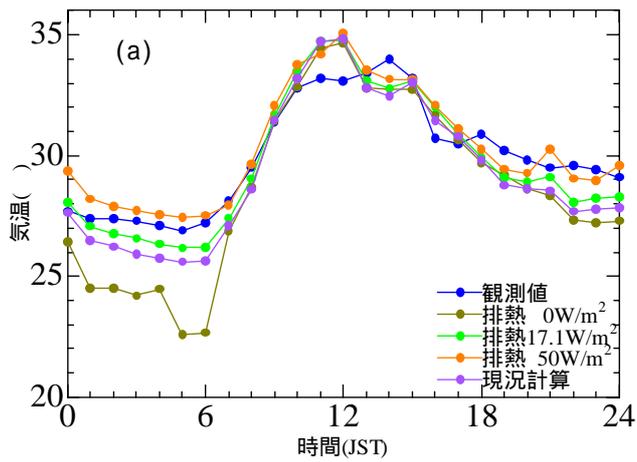


図-6 各地点の気温の時間変化 (a)博多,(b)大濠,(c)大宰府,(d)X2

府と、郊外であるX2における気温の時間変化である。都市部では3地点共に夜間において、排熱量の違いによる影響が認められる。人工排熱を与えないケースでは観測値よりも3~4程度低い値を取るが、現況計算および17.1W/m<sup>2</sup>を時間一様に与えたケースでは、現況計算がやや低い値を示すが観測結果とよく一致している。さらに排熱量を50W/m<sup>2</sup>と大きくすると気温は上昇し、夜間の気温は観測値を2~3上回ることがわかる。一方、日中においては、人工排熱量の違いによる影響はあまり見られなかった。これは、日中では日射量が大きく支配的であるためであり、また日射のない夜間では人工排熱の影響を大きく受けるためと考えられる。郊外のX2では人工排熱が与えられていないため、全てのケースで夜間において観測結果よりも低い値をとっている。現況計算は、人工排熱量が日平均17.1W/m<sup>2</sup>となるよう時間変化を付けて与えており、日中は最高30.8W/m<sup>2</sup>、夜間はおよそ10W/m<sup>2</sup>前後、深夜0時から明け方6時にかけての人工排熱量は、ほぼ0となるよう設定している。しかし、0時から6時にかけて現況計算結果は人工排熱量0のケースよりも高い値を示している。このことから、日中の人工排熱

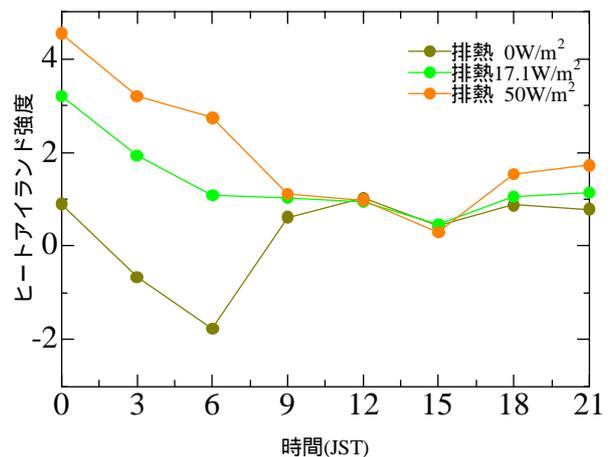


図-7 排熱量の違いによるヒートアイランド強度の時間変化

が深夜から明け方にかけて影響を及ぼし、気温を高めていると推測される。

図-7は排熱量の違いによるヒートアイランド強度の時間変化を示している。6時から18時までの日中では、人

工排熱量0, 人工排熱量17.1W/m<sup>2</sup>, 人工排熱量50W/m<sup>2</sup>のヒートアイランド強度の平均はそれぞれ0.73, 0.86, 0.98となり排熱量の違いによる差は小さい。一方, 夜間18時から6時でのヒートアイランド強度の平均はそれぞれ, -0.18, 1.83, 3.05となり差は大きくなった。このことから, 人工排熱量が増加すると, 夜間, 特に深夜から明け方にかけてヒートアイランド現象を強めていることがわかる。

#### 4. おわりに

Weather Research and Forecasting (WRF)モデルに都市キャノピーモデルオプションを用い, 人工排熱を与えた数値シミュレーションを行い, 福岡都市圏における熱環境特性の再現を試みた。計算結果を観測データと比較して, このモデルの性能を評価するとともに, 人工排熱量が気温に与える影響を検証した。それらの結果を以下に示す。

- (1) 現況計算の計算値と観測値の平面気温分布の比較から, 本計算は高い精度で再現できていると考えられる。
- (2) WRFにおいて, 総消費エネルギー量から算出した福岡都市圏における人工排熱量17.1W/m<sup>2</sup>を日平均として与えることは妥当で, 福岡都市圏の熱環境特性ならびに各地点における気温の経時変化をうまく再現することが可能となった。
- (3) 人工排熱は, 夜間の気温に大きく影響を与え, 排熱量の増加とともに夜間の気温は上昇した。一方, 日中は, 人工排熱量の違いによる気温の変化はそれほど顕著ではなかった。
- (4) 人工排熱量が増加すると, 深夜から明け方にかけてヒートアイランド現象を強めることがわかった。
- (5) 深夜から明け方にかけての気温には, 日中の人工排熱が影響を及ぼしていると推測される。

今後は, 土地利用データにおける都市域についての更なる細分化, 雲量, 日射量をパラメータとして操作することを試み, より高精度のシミュレーションを実施すると同時に, さまざまな人工排熱量を与えた場合のシミュレーションを行い人工排熱が気温に及ぼす影響をより詳細に調べ, 福岡都市圏における熱環境の挙動を明らかにしたい。

謝辞

本研究は, 財団法人日本生命財団による研究助成のもとで行われたことを付記する。

#### 参考文献

- 1) Fujio Kimura and Shunji Takahashi, The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo Metropolitan Area, A numerical experiment, Atmosphere Environment, Vol.25B, No2, pp.154-155, 1991.
- 2) Shunsuke Nakajima, Masakazu Moriyama, Takahiro Tanaka, Hideaki Takebayashi and Shin Dong-hoon, Study on the investigation of the urban climate reproducibility with the meso-scale meteorological model Comparison of MM5, WRF and WRF-Urban Canopy Model, 日本ヒートアイランド学会第3回全国大会予稿集, pp.124-125.2008.
- 3) The Weather Research Forecasting Model Website, <http://www.wrf-model.org>.
- 4) Hroyuki Kusaka and Hiroshi Hayami, Numerical Simulation of Local Weather for a High Photochemical Oxidant Event Using the WRF Model., JSME International Journal Series B Vol.9.No1, Special Issue on Urban Air and Environment Control Technologies pp.72-77. 2006.
- 5) Cuan-Yao Lin, Fei Chen, J. C. Huang, W. C. Chen, Y. A. Liou, W. N. Chen, Shaw C. Liu, Urban heat island effect and its impact on boundary layer development and land-sea circulation over northern Taiwan. Atmospheric Environment, 42, pp. 5639-5649. 2008.
- 6) Oke, T.R., City size and the urban heat island, Atmospheric Environment, 7, pp. 776-779, 1973.
- 7) Hiroyuki Kusaka, Hiroaki Kondo, Yokihiko Kikegawa and Fujio Kimura, A Simple Single-Layer Urban Canopy Model For Atmospheric Models Comparison With Multi-Layer And Slab Models boundary layer meteorology Vol. 101, pp. 329-358. 2001.
- 8) 資源エネルギー庁HP, <http://www.enecho.meti.go.jp/index.htm>
- 9) 久田由紀子, 松永信博, 福岡都市圏における夏季夜間のヒートアイランド構造, 水工学論文集, vol. 50, pp. 499-504, 2006.

(2009.9.30受付)