

# 夏季の名古屋の温熱環境を対象とした現状再現の精度検証と 疑似温暖化手法を併用した将来予測の試み

領域気象モデル WRF による名古屋都市圏の温熱環境シミュレーション (その1)

## A NUMERICAL SIMULATION OF CURRENT STATUS OF SUMMER AND AN ATTEMPT TO PROJECT A FUTURE THERMAL ENVIRONMENT COMBINED WITH PSEUDO GLOBAL WARMING DATA

Numerical study on thermal environment in the Nagoya metropolitan area by using WRF (Part 1)

飯塚 悟\*, 金原和矢\*\*, 日下博幸\*\*\*, 原 政之\*\*\*\*, 秋本祐子\*\*\*\*\*

*Satoru IIZUKA, Kazuya KINBARA, Hiroyuki KUSAKA,  
Masayuki HARA and Yuko AKIMOTO*

Nagoya, which is located in the central part of Japan, is one of the fastest growing cities in Japan. Like other big cities, the problems associated with urban heat islands are very serious in the Nagoya metropolitan area. The increase in the annual-mean surface air temperature for the last 100 years is 2.7°C, and a further increase will likely occur in the future. In this study, an attempt to project a thermal environment in the summers of the 2070s in the Nagoya metropolitan area was conducted by using a regional atmospheric model, WRF. Pseudo global warming data generated by a general circulation model, which was based on the A2 scenario of IPCC Fourth Assessment Report, were used for the initial and boundary conditions in the WRF computations. We also carried out a numerical investigation of the present thermal environment and compared the difference between the present and future status of the thermal environment in the Nagoya metropolitan area. Furthermore, numerical experiments involving the introduction of several countermeasures to improve the projected thermal environment in the summers of the 2070s were performed, and the effects of each countermeasure were quantitatively investigated.

**Keywords :** Urban Thermal Environment, Future Projection, WRF, Pseudo Global Warming Method

都市温熱環境, 将来予測, WRF, 疑似温暖化手法

### 1. 序

現在、世界の人口の半数以上が都市に居住していると言われており<sup>1)</sup>、多くの都市においてヒートアイランド(都市温暖化)の問題が顕在化している。国土の狭い日本では、都市への人口集中・過密化が著しく、都市のヒートアイランド現象が特に顕著となっている。最近の気象庁の報告<sup>2)</sup>によれば、過去100年間の平均気温上昇率は、都市化の影響が少ない中小都市では1.1°Cである一方、大都市では東京で3°C、名古屋で2.7°C、福岡で2.6°Cである。

都市のような広域スケールの温熱環境解析において、数値モデル(シミュレーション)は強力な解析ツールである。気象分野では、Myrup<sup>3), 4)</sup>、Atwater<sup>5)</sup>など、古くから都市温熱環境の数値モデル研究が始められている<sup>6)</sup>。建築分野においても、東京都市圏(関東地方)を対象とした村上ら<sup>7)</sup>、金ら<sup>8), 9)</sup>の研究、大阪都市圏(近畿地方)を対象とした竹林ら<sup>10)</sup>、鳴海ら<sup>11)</sup>の研究など、精力的に数値モデル研究が進められてきている。近年では、コントロールボリュームに基づく都市の熱収支構造の解析も盛んに行われている<sup>12)-15)</sup>。一方で、新しい数値モデル(例えば、領域気象モデル、あるいはメソスケ-

ル気象モデル)の開発も進められてきている。その中で現在、世界中で最も大きな期待を集めているモデルの1つがWRF(Weather Research and Forecasting)モデル<sup>16)-18)</sup>(以下、WRF)である。WRFは、世界最大級のユーザーコミュニティを誇っていたMM5(Fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model)<sup>19)</sup>の後継モデルであり、NCAR(National Center for Atmospheric Research)を始めとするアメリカの数々の気象研究機関の共同プロジェクトにより開発が進められている。WRFは現在、一般的な気象予測を始めとして、集中豪雨、台風、大気汚染など、様々な予測・解析で活用され始めてきている<sup>例えば20)</sup>。

本研究では、WRFを用いて名古屋都市圏の温熱環境の予測・解析を行う。現在のところ、建築分野においてWRFの適用事例はほとんどない。また、名古屋都市圏を対象とした数値モデル研究は、谷川らの先駆的な研究<sup>21)</sup>や最近の気象庁のヒートアイランド監視報告<sup>22)</sup>などがあるが、あまり事例は多くない。本研究ではまず始めに、2006年8月を対象としてWRFによる名古屋都市圏の温熱環境の再現シミュレーションを行い、アメダス観測データとの比較からその

\* 名古屋大学大学院環境学研究科 准教授・博士(工学)

\*\* 名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生

\*\*\* 筑波大学計算科学研究センター 講師・博士(理学)

\*\*\*\* 独立行政法人海洋研究開発機構  
技術研究主事・修士(理学)

\*\*\*\*\* 筑波大学大学院生命環境科学研究科 大学院生

Assoc. Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Dr. Eng.

Graduate Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

Lecturer, Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, Dr. Sci.

Research Scientist, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, M. Sci.

Graduate Student, Graduate School of Life and Environmental Studies, University of Tsukuba

予測精度を検証する。

次に、現状再現シミュレーションで予測精度を確認した WRF を用いて、名古屋都市圏における温熱環境の将来予測を試みる。この将来予測においては、Kimura らの疑似温暖化手法<sup>23)</sup>を用い、バックグラウンドとして地球温暖化の影響を加味する。都市温暖化（ヒートアイランド）と地球温暖化では、①原因（都市温暖化：土地利用の改変やエネルギー消費の増大など、地球温暖化：温室効果ガスの過剰な増加）も、②進行速度（都市温暖化：2～3℃/100 年（日本の場合）<sup>2)</sup>、地球温暖化：0.74℃/100 年<sup>24)</sup>）も大きく異なるが、実際の状況において、それぞれの影響を明確に区別することは非常に困難である。そこで本研究では、上述のように将来の地球温暖化の影響を考慮して名古屋都市圏の温熱環境の将来予測を行うこととする。都市気象・気候の将来予測をするためには本来、①バックグラウンドの気候変化（全球気候変化）、②都市域の拡大（土地利用変化）、③都市構造の変化（建物変化）、④人間活動の変化（人工排熱変化）を考える必要がある。①の影響（地球温暖化の影響）については、全球気候モデルの結果と上述した疑似温暖化手法を用いることにより評価することができる。②～④についても温室効果ガスの排出シナリオのような将来シナリオを設定すれば領域気象モデル内でもこれらの効果を考慮することはできるが、現在のところ、この方面の研究は始まったばかりで信頼性の高いデータは公開されていない。そこで、本研究では①の影響（地球温暖化の影響）のみを考えると、②～④については現状維持を仮定する。②～④に関するより現実的なシナリオの作成は次報以降の課題としたい。以上のような将来予測の試行に加えて、幾つかの温暖化対策を施した場合のシミュレーションを併せて行い、それぞれの気温低減効果についても検討する。

2. シミュレーションの概要

2.1 数値モデル

領域気象モデル WRF<sup>16)-18)</sup>を使用。WRF は完全圧縮・非静力学のモデルで、その適用可能範囲は数 10 m の空間スケールから全球スケールまでとされている。なお、WRF には Advanced Research WRF (ARW)（主に研究用）と WRF-NMM（主に現業（天気予報）用）<sup>25)</sup>の 2 種類があるが、本研究では WRF ver.3.0.1.1 の ARW を使用。

2.2 解析領域

図 1 に示すように、3 段階のネスティングを使用する。第 3 領域が主となる解析領域で、その水平方向の範囲は名古屋市街地（図中☆印）を中心とする濃尾平野 120 km×120 km とする。

2.3 解析ケース

表 1 に示す 5 ケースを解析ケースとする。case 1 が現状（2006 年 8 月）を対象としたケースである。case 1 とアメダス観測データの比較により、本研究で用いる WRF の予測精度の検証を行う。

case 2-0～case 2-3 は将来予測のケースであり、2070 年代の夏季を対象としている。これらの将来予測では今後想定される地球温暖化の影響をバックグラウンドとして考慮する。2070 年代の地球温暖化の影響は Kimura らの疑似温暖化手法<sup>23)</sup>を用いて模擬しているが、これについては 2.5 節で後述する。case 2-1～case 2-3 は case 2-0 に対して温暖化対策を施したケースである。それぞれの温暖化対策は都市部においてのみ行い、case 2-1 が「人工排熱を付加しない」ケー

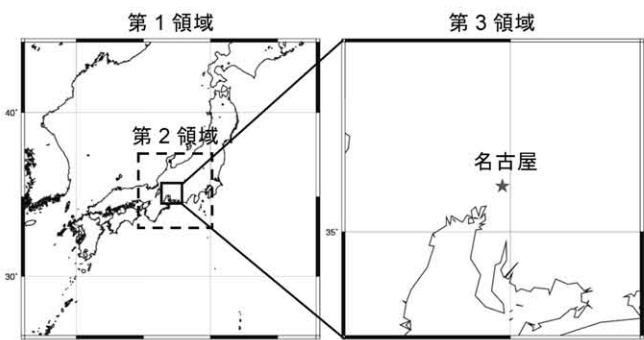


図 1 解析領域

表 1 解析ケース

ケース	時代	人工排熱	アルベド	蒸発効率
case 1	現状 2006 年 8 月	あり	0.1	0.0
case 2-0	将来 2070 年代 8 月	あり	0.1	0.0
case 2-1		なし	0.1	0.0
case 2-2		あり	0.3	0.0
case 2-3		あり	0.1	0.3

表 2 解析領域の大きさと格子数

領域	大きさ x×y×z [km]	格子数 x×y×z
第 1 領域	1975×1975×18.8	79×79×34 (水平格子：25 km)
第 2 領域	500×500×18.8	100×100×34 (水平格子：5 km)
第 3 領域	120×120×18.8	120×120×34 (水平格子：1 km)

表 3 都市キャノピーモデルの各種パラメータ

建物平均高さ [m]	7.5 <sup>※3)</sup>	緑地率 [-]	0.1
天空率 [-]	0.56	日最大人工排熱 [W/m <sup>2</sup> ]	50 <sup>※4)</sup>
建ぺい率 [-]	0.5		

表 4 各種土地利用区分の地表面パラメータ

	アルベド [-]	蒸発効率 [-]	放射率 [-]	粗度長 [m]	熱慣性 [cal/cm <sup>2</sup> Ks <sup>1/2</sup> ]
湿った 牧草地と 放牧地	0.18	0.5	0.985	0.1	0.04
草原	0.19	0.15	0.96	0.12	0.03
混合林	0.13	0.3	0.97	0.5	0.04
水域	0.08	1	0.98	0.01	0.06

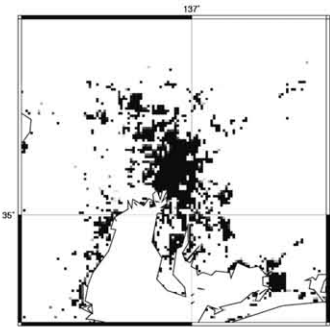


図 2 第 3 領域内の「都市」区分域（黒色の部分）



ス<sup>注1)</sup>、case 2-2 が「アルベド（日射反射率）を増加させた」ケース、case 2-3 が「蒸発効率を増加させた」ケースである<sup>注2)</sup>。ここで、case 2-2 のアルベドの増加は、通常の都市の状況から都市（建物）の色彩を白または淡色に変更した場合を想定<sup>8)</sup>し、case 2-3 の蒸発効率の増加は、通常の都市の状況から都市（建物）緑化や保水性建材・舗装を活用した状況に変更した場合を仮定している。

## 2.4 解析条件

表 2 にネスティング各段階の解析領域の大きさ（図 1 も参照）と格子数を示す。case 1（現状）の初期条件と境界条件には NCEP（National Centers for Environmental Prediction）Final Analysis データ（解像度  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 、6 時間毎）を利用。一方、case 2-0～case 2-3（将来）の初期条件と境界条件には 2.5 節で述べる疑似温暖化データを使用。1 章でも述べたように、土地利用や人工排熱のデータは case 1（現状）と case 2-0～case 2-3（将来）で同じ。これらの将来シナリオの組み込みは今後の課題の 1 つである。土地利用は平成 9 年国土数値情報土地利用 3 次メッシュデータ（格子間隔 100 m）<sup>26)</sup>を基に、USGS（United States Geological Survey）の土地利用データで用いられている 5 区分（①都市、②湿った牧草地と放牧地、③草原、④混合林、⑤水域）に再分配している。乱流モデルは Mellor-Yamada-Janjic モデル<sup>27), 28)</sup>を使用。地表面モデルは Noah-LSM を用い、さらに都市部では Kusaka らの都市キャノピーモデル<sup>29)</sup>を適用。なお、都市キャノピーモデル中の各種パラメータは表 3 のように設定している<sup>注3), 4)</sup>。都市部以外の土地利用区分の地表面パラメータについては表 4 に示す。海面温度は NCEP 作成の RTGSST（Real-Time, Global, Sea Surface Temperature）を用いている。

アメダス観測データとの比較のため、case 1 の解析対象期間は 8 月の 1 ヶ月間。ただし、助走計算を含めるため、7 月 30 日午前 9 時から積分を開始している。一方、case 2-0～case 2-3 の将来予測は 2070 年代の 8 月 3 日午前 9 時から 8 月 7 日午前 3 時に相当する約 4 日間を積分している。シミュレーションの時間差分間隔は全ての解析ケースで 6 秒。Intel Core 2 Quad（2.83GHz）を搭載した Linux PC で積分を実行し、全てのケースにおいて 1 時間ステップあたりの CPU 時間は約 2.2 秒（解析期間が 1 ヶ月であれば実行に約 11 日）。

## 2.5 将来予測のための疑似温暖化手法の導入

2.3、2.4 節で述べたように、case 2-0～case 2-3 の将来予測は 2070 年代の夏季を想定しており、その将来の地球温暖化の影響を加味するために、Kimura らの疑似温暖化手法<sup>23)</sup>を用いている。本研究では、大気海洋結合モデル MIROC<sup>30)</sup>（約 200 km 水平格子）により予測された、①2070 年代（IPCC 第 4 次評価報告書<sup>24)</sup> A2 シナリオベース）の 10 年平均気候値と、②1990 年代の 10 年平均気候値の「気候差分」

（①－②）を 2006 年 8 月の NCEP Final Analysis データに付加することにより、「疑似温暖化データ」を作成。その疑似温暖化データを WRF の初期条件および境界条件として用いることにより、2070 年代を想定した将来予測（case 2-0～case 2-3）を実施している。

## 3. シミュレーション結果と考察

### 3.1 観測データとの比較に基づく予測精度の検証（case 1）

シミュレーションの信頼性を確保する上で、観測や実験（風洞実験など）との比較に基づく予測精度の検証は不可欠である。ここでは、名古屋地方気象台のアメダス観測データと case 1 の結果の比較

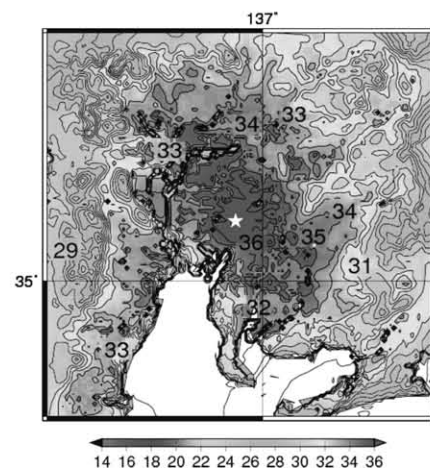


図 3 現状（case 1）の気温分布  
（2006 年 8 月 5 日 14 時、高さ 2 m）

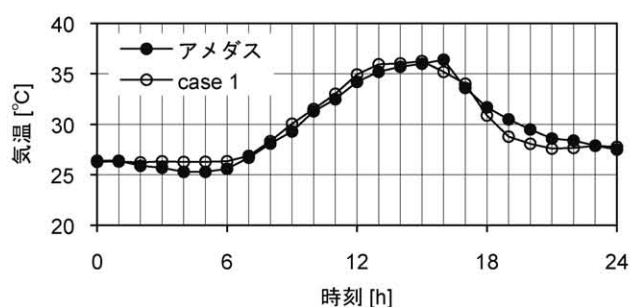


図 4 名古屋における気温の日変化の比較  
（アメダス：高さ 1.5 m、case 1：高さ 2 m）

を中心に、シミュレーション（WRF）の予測精度を確認する。

### (1) 気温の日変化

以下では、日本上空が太平洋高気圧に覆われた典型的な夏型の気圧配置である 2006 年 8 月 5 日の結果を示す。ちなみに、この 8 月 5 日を含む 8 月上旬は晴天日が続いていた。図 3 は case 1 の結果で、2006 年 8 月 5 日 14 時、高さ 2 m の気温分布である。名古屋市街地（図中☆印）を中心に顕著なヒートアイランドが形成されていることが見てとれる。図 4 は、同日の名古屋における気温の日変化について、アメダス観測データ（高さ 1.5 m）と case 1 の結果（高さ 2 m）を比較したものである。なお、case 1 の結果は名古屋地方気象台が位置する  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  格子内（第 3 領域の水平格子内）のものである。夜間（18 時以降）、深夜や早朝（2 時以降）において若干の違いが見られるが、全体的に両者は非常に良く一致している。夜間、深夜や早朝における気温の差異は、シミュレーション（WRF）において、①人工排熱量の日変化、②地表面モデル、③風の場合（後述の図 5 参照）、の精度が十分でないことなどが理由として考えられる。

### (2) 風向・風速の日変化

図 5 は(1)と同じ 2006 年 8 月 5 日の風向・風速（高さ 17.9 m）の日変化について、アメダス観測データと case 1 の結果を比較したものである。気温の結果（図 4 参照）ほどの一致は見られないが、両者は概して良く対応した結果となっている。

### (3) 気温のヒストグラム

2006 年 8 月の 1 ヶ月間の名古屋における気温のヒストグラムにつ

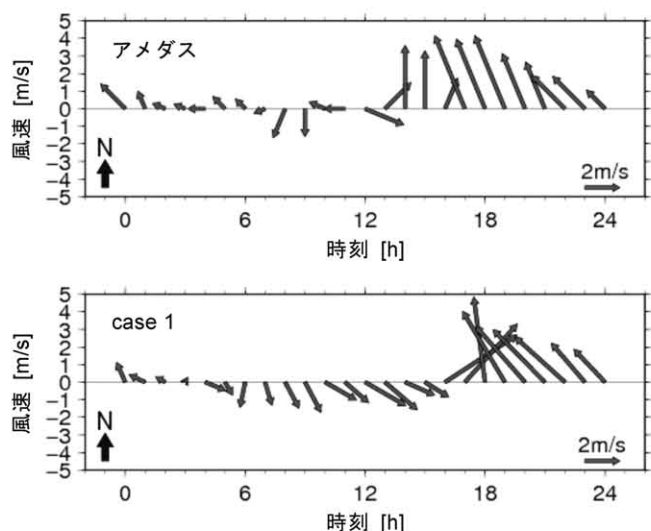


図5 風向・風速の日変化の比較

(2006年8月5日14時、高さはアメダス、case 1ともに17.9 m)

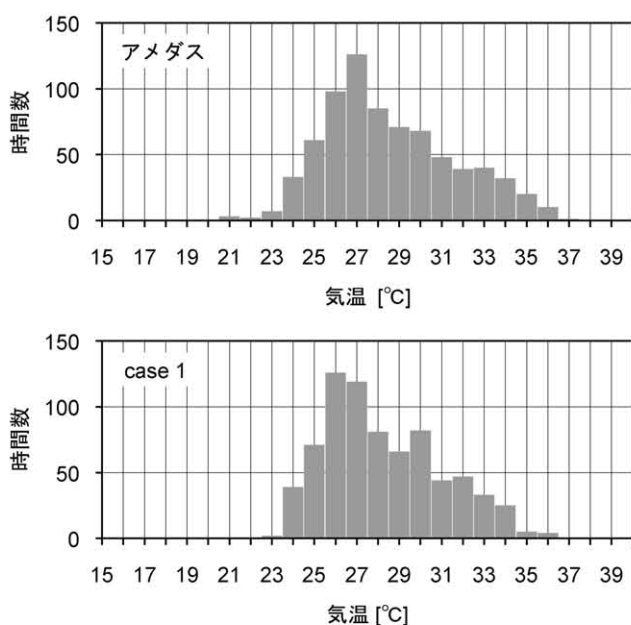


図6 気温のヒストグラム (2006年8月)

(アメダス：高さ1.5 m、case 1：高さ2 m)

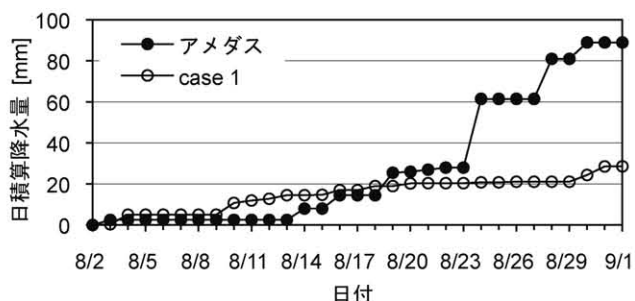


図7 日積算降水量の比較 (2006年8月)

いて、アメダス観測データ (高さ1.5 m) と case 1 の結果 (高さ2 m) を比較したものを図6に示す。全体的には両者は良く一致している。細かく見ると幾つかの違いが見られるが、シミュレーションでは降

表5 観測と case 1 の気温の平均誤差および2乗平均平方根誤差

	ME	RMSE		ME	RSME
名古屋	0.057	0.767	金山	-1.486	2.685
愛西	-2.216	2.340	黒川	-1.250	1.680
セントレア	-2.419	3.016	美濃	-1.965	2.114
蒲郡	-2.545	2.783	美濃加茂	-2.805	2.928
稲武	-0.257	1.222	中津川	-1.508	1.763
伊良湖	-1.251	1.463	大垣	-1.859	2.052
南知多	-1.432	1.719	関ヶ原	-1.802	2.113
岡崎	-0.742	1.450	多治見	-0.933	1.517
新城	-0.969	1.325	樽見	-1.639	2.510
東海	-0.729	1.470	津	-1.243	1.600
豊橋	-0.584	0.808	亀山	-1.486	2.394
豊田	-1.874	2.161	桑名	-1.443	1.894
岐阜	-1.254	1.426	四日市	1.294	1.902
恵那	-1.823	2.091	米原	-1.120	1.861
揖斐川	-1.358	1.748	土山	-1.941	2.854
			30点平均	-0.845	1.570

水の予測精度が十分でないことがその大きな理由の1つと考えている。図7はアメダス観測データと case 1 の降水量の積算値を比較したものである。2006年8月の1ヶ月間において、case 1 では観測された降水量の1/3程度の降水量しか予測できていない。この点については今後、雲物理モデルや放射モデルの検討や、境界条件として用いた客観解析データの変更などにより改善を図っていきたいと考えている。

#### (4) アメダス観測各地点データとの誤差評価

川本ら<sup>31)</sup>は東京都市圏を対象とした解析で、アメダス観測26地点における気温のシミュレーション結果の平均誤差 (ME: Mean Error) と2乗平均平方根誤差 (RMSE: Root Mean Square Error) を算出し、誤差評価を行っている。同様のことを、本シミュレーションの第3領域 (図1参照) 内に位置するアメダス観測30地点について行った結果を表5に示す。ここで、表5のMEおよびRMSEは2006年8月5日の1時間毎のデータを用いて算出している。表5では誤差が比較的大きい地点もあるが、アメダス地点が必ずしもその点を含む格子領域を代表する点となっていない<sup>31)</sup>ことや、アメダス地点の観測環境の善し悪しがあるので (劣悪な環境の場合もあり)、その評価には注意が必要である。表5の中では名古屋 (名古屋地方気象台) の結果が最も誤差が少ない結果となっているが、この地点の観測環境が他の地点に比べて相対的に良いこともその理由の1つとして考えている。

#### 3.2 疑似温暖化手法を併用した将来予測 (case 2-0~case 2-3)

3.1節で示したように、今後改善すべき点も幾つか含まれるが、本研究で用いているシミュレーション手法は十分精度の高いものであると考える。以下では、そのシミュレーション手法に2.5節で述べた疑似温暖化手法を併用して行った将来予測 (case 2-0~case 2-3) の結果を示す。なお、2.4節で述べたように、この将来予測は8月3日午前9時から8月7日午前3時に相当する約4日間を積分している。比較対象とする現状再現シミュレーションでは降水の予測精度が十分とは言えず (3.1節(3)参照)、晴天日を対象とした場合の方がより信頼性の高い結果と考えられるため、2006年8月の観測結果で晴天日が続いていたとされる上記の日程を将来予測の実施期間とすることとした。しかしながら、このような長期的な将来予測において具体的な日付を特定することに意味はない。あくまで、現状と同様



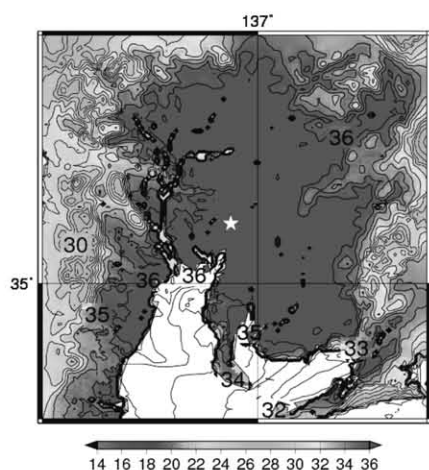


図8 将来 (case 2-0) の気温分布  
(2070 年代 8 月 5 日 14 時、高さ 2 m)

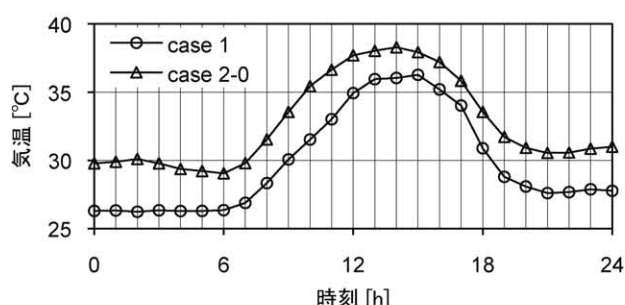


図9 現状 (case 0) と将来 (case 2-0) の気温の日変化の比較  
(8 月 5 日、高さ 2 m)

の気圧配置が見られたときの晴天日を想定したという位置づけの将来予測であり、2070 年 8 月 3 日から 8 月 7 日の予測を行っているのではないことに注意されたい。ただし、本研究で行っている将来予測はその初期条件を、現状のある特定日の条件+気候差分 (2070 年代の 10 年平均気候値と 1990 年代の 10 年平均気候値の差分) として用いているので (2.5 節参照)、記述の便宜上、現状のその特定日 (8 月 3 日) を将来予測の開始日に設定することとした。なお、解析開始当初の分は助走計算と考え、以下では 8 月 5 日 (将来予測においてはあくまで記述の便宜上の日付) の結果を示すこととする。

#### (1) 現状再現シミュレーションとの比較

2070 年代の 8 月 5 日 (2070 年代で case 1 と同様の気圧配置が見られたときを想定) の 14 時、高さ 2 m の気温分布について、case 2-0 の結果を図 8 に示す。比較のため、図 8 の温度の色の濃淡の表示範囲は図 3 と統一している。case 1 (現状、図 3 参照) と比べて、case 2-0 (将来) では高温域が格段に拡大している<sup>注 5)</sup>。図示している範囲・時間では、case 2-0 の結果の方が case 1 よりも 1~4℃ほど高い。また、case 1 では 37℃以上となる領域は現れないが、case 2-0 では 37℃以上となる領域が図示している範囲の 17.2 %、38℃以上が 7 %、39℃以上が 1.5%の割合で現れている。

図 9 は、名古屋地方気象台が位置する 1 km×1 km 格子内 (第 3 領域の水平格子内) の気温の日変化 (高さ 2 m) について、case 1 (現状) と case 2-0 (将来) を比較したものである。一日を通じて、case 2-0 の方が case 1 よりも 1~4℃ほど高い。また、両者の差は日

中よりも夜間や深夜の方が大きい。ただし、既述したように、今回行った将来予測では土地利用や人工排熱のデータは現状と同じものを用いている。今後はこれらの将来シナリオを組み込み、さらに詳細な検討を行う予定である。

#### (2) 各種温暖化対策の検討

今回行った将来予測 (case 2-0) では、濃尾平野の広範囲に渡って高温域が現れることが示された (図 8 参照)。そこで次に、表 1 に示す各種の温暖化対策 (case 2-1~case 2-3、2.3 節参照) を施した場合の気温低減効果について検討する。

図 10 に 2070 年代の 8 月 5 日 (2070 年代で case 1 と同様の気圧配置が見られたときを想定) の 14 時、高さ 2 m の気温分布<sup>注 5)</sup>、図 11 に名古屋における気温 (高さ 2 m) の日変化の比較を示す (図 11 は図 9 と同じ位置の 1 km×1 km 格子内の結果)。図 12 は case 2-1~case 2-3 と何も対策を施していない case 2-0 との気温差を示したものである。

case 2-1 (人工排熱を付加しないケース) は、図 10(1)と(2)の比較、図 11、図 12 から分かるように、昼間においてほとんど気温低減効果がない。一方、夜間、特に深夜から早朝にかけては、case 2-0 (対策なしのケース) との気温差は 1~2℃程度となる (図 12 参照)。つまり、人工排熱の影響は特に夜間に顕著となることが分かる。以上のような傾向、すなわち人工排熱の影響による気温上昇幅は昼間に小さく、夜間に大きくなることは、鳴海ら<sup>9)</sup>の大阪都市圏を対象とした温熱環境解析<sup>11)</sup>においても同様に報告されている。

case 2-2 (アルベドを増加させたケース) は、夜間にその効果が見られないのは当然であるが、昼間においては case 2-0 と比べて 1℃程度の気温低下が見られている (図 12)。金らが東京都市圏を対象とした解析<sup>8)</sup>において、建物用地のアルベドを変化させた場合 (0.1→0.3) の検討を行っているが、建物用地のアルベドを増加させた場合、日中の都心部 (大手町) の気温 (高さ 10 m) が約 1℃低下したと報告している。図 12 で示している結果 (高さ 2 m において case 2-0 と比べて 1℃程度の気温低下) とは高さが異なるが、ほぼ同様の傾向と考えられる。

case 2-3 (蒸発効率を増加させたケース) は case 2-2 と同様、夜間の気温低減効果は小さいが、昼間においては case 1 との気温差は 2~3℃あり、今回比較した対策の中では最も気温低減が大きい。昼間においては、蒸発効率を大きくする、すなわち蒸発散を増加させることが都市の気温低下に大きく寄与すると考えられる。日中のヒートアイランド形成に対して蒸発効率の影響が大きいことは既往の研究<sup>5), 22), 32)</sup>でも報告されている。Kimura ら<sup>32)</sup>は、Boussinesq 近似・静力学平衡に基づく比較的簡易な数値モデルを用いて東京都市圏を対象とした感度解析 (土地利用の改変 (都市→緑地) と人工排熱の除去) を行い、日中の気温上昇において土地利用改変の影響 (蒸発効率の影響) が大きくなることを示している。最近の気象庁のヒートアイランド監視報告<sup>22)</sup>においても、比較的簡易な静力学モデルを用いて名古屋都市圏を対象とした感度解析を行った結果、日中の気温上昇において土地利用改変の影響 (蒸発効率の影響) が大きく、人工排熱の影響は小さいことが報告されている。

以上のように、今回比較した対策の中では蒸発効率の増加が最も気温低減効果が大きく、日中で 2~3℃程度の気温低下が得られている。しかし一方、(1)で記述したように、バックグラウンドの気候変



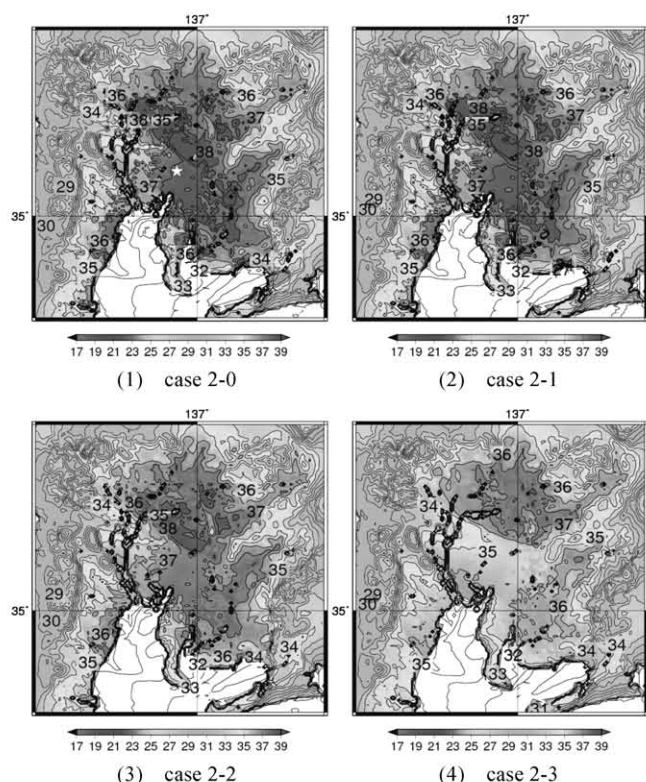


図 10 各種温暖化対策の効果の比較 (14 時、高さ 2 m)

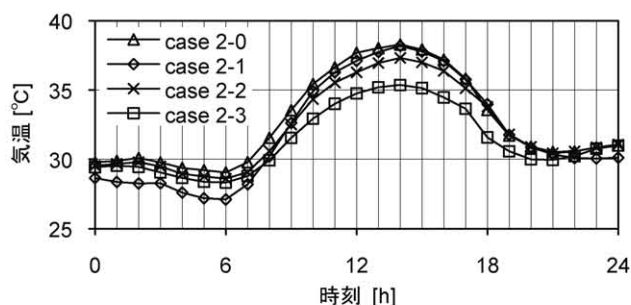


図 11 名古屋における気温の日変化の比較 (高さ 2 m)

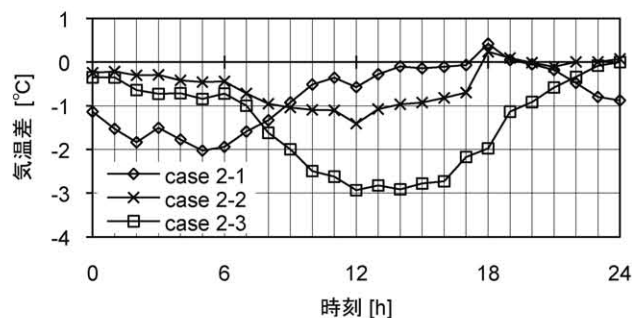


図 12 case 2-0 との気温差の日変化の比較 (高さ 2 m)

化（地球温暖化の影響）による気温上昇は最大 4℃程度である。したがって、現状維持を目指すとしてもさらなる温暖化対策が必要と考えられ、今後検討していく予定である。

#### 4. まとめ

本研究では、世界最新の領域気象モデル WRF を用いて、名古屋

都市圏における温熱環境の現状再現シミュレーションおよび 2070 年代の将来予測の試みを行った。将来予測に関しては、3 つの温暖化対策を施した場合の気温低減効果についても検討した。

- (1) 現状再現シミュレーションの結果はアメダス観測データと良い一致を示した。特に気温に関して、両者は非常に良く対応した。両者の比較結果から、本研究で用いた WRF の予測精度は十分に高いものと判断される。ただし、降水の予測精度が十分とは言えず、WRF の予測精度のさらなる向上のためにはその改善が課題の 1 つとなる。
- (2) 今回行った将来予測では、都市や人間活動を現状維持と仮定し、バックグラウンドの気候変化（地球温暖化の影響）のみを考慮した。そのシナリオの場合、2070 年代の名古屋都市圏における日中の高温域は現状と比べて大幅に拡大した。また、その将来予測では 40℃近くの高温となるところも生じた。
- (3) 高温域が広範囲に拡大する将来予測に対して、①人工排熱の除去、②アルベドの増加、③蒸発効率の増加、の 3 つの温暖化対策の検討を行った。それぞれの対策の気温低減効果は既往の研究で見られる傾向と同様の傾向を示した。今回用いた温暖化対策の中では、蒸発効率の増加、すなわち蒸発散の増加が気温低減効果に大きく寄与する結果となった。蒸発散を増加させるための具体的な対策やその効果については、今後さらに詳細に調べていく予定である。また、バックグラウンドの気候変化（地球温暖化の影響）による気温上昇が今回行った対策の気温低減効果を上回る場合もあり、今後さらなる温暖化対策も検討していく予定である。

#### 注

- 注 1) 将来において人工排熱が完全になくなることはないが、人工排熱の影響を明確に把握するために、ここでは人工排熱を付加しない条件を設定した。
- 注 2) 表 1 に示した蒸発効率 0.0 および 0.3 という値は都市キャノピーモデル中のパラメータの値である。ただし、「都市」区分内の格子（第 3 領域水平 1 km×1 km）内全てを都市（建物群）としてしまうのは現実的ではないため、「都市」区分格子の 1 割は緑地として与えている。したがって、「都市」と区分している格子では、都市部と緑地の潜熱の重み付け（9:1 の重み付け）で潜熱量を算出している。
- 注 3) 本研究では、都市部の建物平均高さ（水平 1 km×1 km 格子内平均としての建物高さ）は一定値を用いているが、実際には「都市」と区分している場所ごとにその値は異なる。今後、より詳細な建物データを整備していく予定である。
- 注 4) 都市の中心部においては、人工排熱量が最大 100~200 W/m<sup>2</sup> 程度となる地域もあるが、今回のシミュレーションでは、（一般に人工排熱量が多い）高層建物や（一般に人工排熱量の少ない）低層建物が混在する水平 1 km×1 km 格子を用いているため、1 km 格子平均で最大 100 W/m<sup>2</sup> や 200 W/m<sup>2</sup> を与えるのは過剰だと判断し、原単位法で作成した東京の排熱マップデータ<sup>33)</sup>を参考に最大 50 W/m<sup>2</sup> とした。人工排熱データの正確な把握は難しく、この値の妥当性については今後さらに詳細に検討していきたい。
- 注 5) 図 8 と図 10(1)は同じ case 2-0 の結果であるが、温度の色の濃淡の表示範囲が異なることに注意。図 8 は 14℃~36℃、図 10(1)は 17℃~39℃の範囲で表示している。図 10(1)のように表示すると、図 3 に示す case 1 の結果と同様、case 2-0 でも名古屋市街地を中心としたヒートアイランドが明確に見てとれる。

#### 参考文献

- 1) 持田灯：特集「ヒートアイランド対策国際ワークショップ報告」ヒートアイランド対策の論理と全体の枠組み—セッション 3 からの報告—, IBEC（建築環境・省エネルギー機構）2006.11 月号, pp.12-13, 2006.11.

- 2) 気象庁：異常気象レポート 2005, 2005.10.
- 3) Myrup, L. O. : A numerical model of the urban heat island, *Journal of Applied Meteorology*, 8, pp.908-918, 1969.
- 4) Myrup, L. O. : Corrigendum to Myrup, L. O., 1969, *Journal of Applied Meteorology*, 9, p.541, 1970.
- 5) Atwater, M. A. : Thermal effects of urbanization and industrialization in the boundary layer: A numerical study, *Boundary-Layer Meteorology*, 3, pp.229-245, 1972.
- 6) 日下博幸：都市気候モデリング研究の取り組みと今後の課題, *天気*, 55, pp.227-240, 2008.4.
- 7) 村上周三, 持田灯, 金相ジン, 大岡龍三：関東地方における土地利用状況の変化と流れ場・温度場の関係—Mellor-Yamada 型の都市気候モデルによる局地気象解析, *日本建築学会計画系論文集*, 491, pp.31-39, 1997.1.
- 8) 金相ジン, 村上周三, 持田灯, 大岡龍三：数値気候モデルによる関東地方の都市気候解析—建物の albedo の変化による影響—, *生産研究*, 52(1), pp.9-14, 2000.1.
- 9) 金相ジン, 村上周三, 持田灯, 大岡龍三, 吉田伸治：数値気候モデルによる都市化がもたらす関東地方の気候変化のメカニズムの解析, *日本建築学会計画系論文集*, 534, pp.83-88, 2000.8.
- 10) 竹林英樹, 森山正和, 村上周三, 大岡龍三, 持田灯, 芝池英樹, 吉田伸治：数値モデルによる計算結果と観測データを併用した都市スケールの気候解析, *日本建築学会計画系論文集*, 556, pp.63-68, 2002.6.
- 11) 鳴海大典, 大谷文人, 近藤明, 下田吉之, 水野稔：都市における人工排熱が都市熱環境に及ぼす影響—都市熱環境評価モデルを用いたヒートアイランド現象の改善策に関する検討 その 1—, *日本建築学会計画系論文集*, 562, pp.97-104, 2002.12.
- 12) 大岡龍三, 吉田伸治, 村上周三, 佐々木澄, 持田灯, 吉野博：都市の熱代謝モデルの提案と緑化に係わる熱収支分析—都市気候モデルに基づく東京の都市熱環境の分析, *日本建築学会環境系論文集*, 579, pp.73-80, 2004.5.
- 13) 佐々木澄, 持田灯, 吉野博, 渡辺浩文, 吉田知弘：海風が卓越する夏季晴天日における規模の異なる 3 つの太平洋沿岸都市, 東京, 仙台, 原町の中心部の大気部熱収支構造の比較—気候数値解析に基づく都市気候の地域特性の定量化 (その 1)—, *日本建築学会環境系論文集*, 595, pp.121-128, 2005.9.
- 14) 佐々木澄, 吉田知弘, 持田灯, 渡辺浩文, 吉野博：典型的夏季晴天日を対象とした大気部熱収支構造の定量評価に基づく都市内部の熱収支 MAP の試作—気候数値解析に基づく都市気候の地域特性の定量化 (その 2)—, *日本建築学会環境系論文集*, 602, pp.85-92, 2006.4.
- 15) 佐藤大樹, 大岡龍三, 村上周三：メソスケール数値解析による海風の進入経路に沿った移動領域の顕熱・潜熱・平均運動エネルギー収支分析, *日本建築学会環境系論文集*, 73(630), pp.1029-1035, 2008.8.
- 16) Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X. Y., Wang, W., Powers, J. G. : A description of the Advanced Research WRF version 3, NCAR/TN-475+STR, NCAR Technical Note, 2008.6.
- 17) WRF Model Users Page : <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>, 2008.8.1 参照.
- 18) 日下博幸：領域気象モデル WRF について, *ながれ*, 28(1), pp.3-12, 2009.2.
- 19) Grell, G. A., Dudhia, J., Stauffer, D. R. : A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR/TN-398+STR, NCAR Technical Note, 1995.
- 20) 飯塚悟, 中村恭志 編：特集「次世代気象モデルの開発事例と気象シミュレーションの最先端」, *ながれ*, 28(1), 2009.2.
- 21) 谷川努, 坂本雄三, 中原信生：名古屋市の都市気候に関する研究(その 5) 3 次元流体解析モデルによる夏期気候の計算結果と緑地の効果, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, D, 環境工学, pp.785-786, 1993.9.
- 22) 気象庁：ヒートアイランド監視報告 (平成 20 年—東海地方—), <http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/himr/index.html>, 2009.5.29 参照.
- 23) Kimura, F., Kitoh, A. : Downscaling by pseudo global warming method, The Final Report of the ICCAP, Research Institute for Human and Nature, Kyoto, Japan, 2007.
- 24) IPCC Fourth Assessment Report : Climate Change 2007, <http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>, 2007.11.30 参照.
- 25) WRF-NMM Users Page : <http://www.dtcenter.org/wrf-nmm/users/>, 2008.8.1 参照.
- 26) 国土交通省国土計画局：国土数値情報ダウンロードサービス, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>, 2008.8.1 参照.
- 27) Janjic, Z. I. : The step-mountain coordinate: physical package, *Monthly Weather Review*, 118, pp.1429-1443, 1990.6.
- 28) Janjic, Z. I. : Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP meso model, NCEP Office Note, No. 437, 2002.
- 29) Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y., Kimura, F. : A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models, *Boundary-Layer Meteorology*, 101, pp.329-358, 2001.12.
- 30) Nozawa, T., Nagashima, T., Ogura, T., Yokohata, T., Okada, N., Shiogama, H. : Climate change simulations with a coupled ocean-atmosphere GCM called the model for interdisciplinary research on climate: MIROC, CGER's Supercomputer Monograph Report 12: Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan, 2007.
- 31) 川本陽一, 大岡龍三：MM5 を用いた都市気候解析モデルの構築(その 1) 地表面パラメータ設定の改良、及び人工排熱影響の組み込み, *日本建築学会環境系論文集*, 631, pp.1125-1132, 2008.9.
- 32) Kimura, F., Takahashi, S. : The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area: A numerical experiment, *Atmospheric Environment*, 25B, pp.155-164, 1991.
- 33) 資源環境技術総合研究所：大都市における夏季高温化対策技術の評価手法の開発, 環境影響予測部研究資料 97-1, 1997.3.

(2009年7月10日原稿受理, 2009年9月30日採用決定)