

IPCC SRES A2 シナリオ下での三大都市圏の夏季気候の将来予測: WRF-UCM による力学的ダウンスケーリング

Urban climate projection in the 2070's Augusts for the three major metropolitan areas under the IPCC SRES A2 emission scenario: Dynamical downscaling by the WRF-UCM

高根 雄也*¹ 日下 博幸*² 原 政之*³
Yuya Takane Hiroyuki Kusaka Masayuki Hara

*¹ 筑波大学大学院生命環境科学研究科 Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

*² 筑波大学計算科学研究センター Center for Computational Sciences, University of Tsukuba

*³ 独立行政法人海洋研究開発機構 地球環境変動領域 RIGC, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Corresponding author: Yuya Takane, yuya.takane.0911@gmail.com

ABSTRACT

There are few studies that conducted urban climate projection using Regional Climate Model (RCM) with high horizontal resolution that is capable of resolving urban area. In this study, urban climate projection for the 2070's August for the three major Japanese metropolitan areas was performed by the Weather Research and Forecasting (WRF) model with 3-km grid increment coupled with an Urban Canopy Model (UCM). Dynamical downscale approach is adopted to simulate 2070's urban climate using MIROC3.2-medres with IPCC SRES A2 emission scenario as a downscale source. The observed characteristics of heat island at early morning is well simulated both in 2000s and 2070s on the three major metropolitan area. Surface air temperatures at 5 Japan Standard Time (JST) in 2070's in Nerima (Tokyo), Nagoya, and Osaka are 27.5°C, 28.5°C, and 28.7°C, and are 3.1°C, 2.9°C, and 3.2°C higher than that of 2000's, respectively. As in observations, the simulated mid-day (14 JST) temperature is the highest in the inland areas of the three major cities both in 2000s and 2070s. The temperature at 14 JST in 2070's in Nerima, Nagoya, and Osaka are 33.6°C, 34.9°C, and 34.9°C, and are 3.1°C, 3.4°C, and 3.0°C higher than that of 2000's, respectively.

キーワード: ヒートアイランド, 力学的ダウンスケーリング, WRF-UCM, 擬似温暖化手法

Key Words : Urban heat island, Dynamical downscaling, WRF-UCM, Pseudo-global warming method

1. はじめに

現在, 地球温暖化による将来の都市熱環境の悪化が危惧されている。将来の都市熱環境を予測するためには, 都市を表現できるくらい空間解像度の高い全球気候モデル (以後, GCM) によって現在から将来まで数値積分するか, GCM の結果を初期値・境界値にして, ダウンスケール実験を行う必要がある。

これまで, GCM による将来の気候予測実験では, McCarthy ら⁽¹⁾ や Oleson ら⁽²⁾ のグループを除き, 都市の影響は考慮されてこなかった。近年, McCarthy et al.⁽¹⁾ や Oleson et al.⁽²⁾ によって, 都市キャノピーモデル (以後, UCM) を結合した GCM を用いて, 温暖化に対する都市の影響が調査され始めているが, GCM の水平格子間隔は一般的に 100 km 以上あるため, GCM で日本の都市圏を表現

することは難しい。空間分解能の高い 20 km の GCM を使用しても, 首都圏など一部の大都市圏が表現される程度であり, 都市化の影響を評価するには十分ではない⁽³⁾ (図 1)。

都市を高解像度で表現する手法の一つとして, 領域気候モデル (RCM) を用いて対象領域を高解像度で計算する力学的ダウンスケーリングがある。力学的ダウンスケーリングの詳細については, Dickinson et al.⁽⁴⁾ や Giorgi and Bates⁽⁵⁾ といった論文や, 日下・原⁽³⁾ などの解説を参照されたい。

日本全域を対象とした領域気候モデルの空間解像度は一般的に 20 km 程度あり⁽⁶⁾⁽⁷⁾, この解像度の RCM では GCM 同様, 都市を十分に表現できない。

近年, 都市気候の将来予測実験を目的とした空間分解能 5 km 以下の RCM による力学的ダウンスケール実験が行われはじめている (表 1, 図 1)。原ほか⁽⁸⁾ は UCM を結合した Weather Reserch and Forecasting (WRF) モデル⁽⁹⁾ (以降,

WRF-UCM) を用いて、冬季の首都圏の 2070 年代の都市気候の予測実験を 3 km の水平格子間隔で実施した。この実験において、彼らは WRF-UCM の初期値・境界値として SRES (Special Report on Emissions Scenarios) A2 シナリオ⁽¹⁰⁾ (多元化社会シナリオ。各国や地域が独自に発展、世界人口は増加し、相対的に環境への関心が薄い) に基づいた MIROC⁽¹¹⁾ の予測結果を使用している。ただし、彼らによる将来予測実験の積分期間はある特定の年の 1 ヶ月のみであ

った。同様の方法で飯塚ほか⁽¹²⁾⁽¹³⁾ は夏季の名古屋都市圏の 2070 年代の気候予測実験を行ったが、原ほか⁽⁸⁾ と同様に積分期間はある特定の年の 1 ヶ月のみであった。ある特定の年のみの計算では、予測結果に年々変動の影響が強く現れている可能性があり、気候値として将来予測実験の結果を評価する場合には不確実性を十分に評価することが出来ないという問題がある。

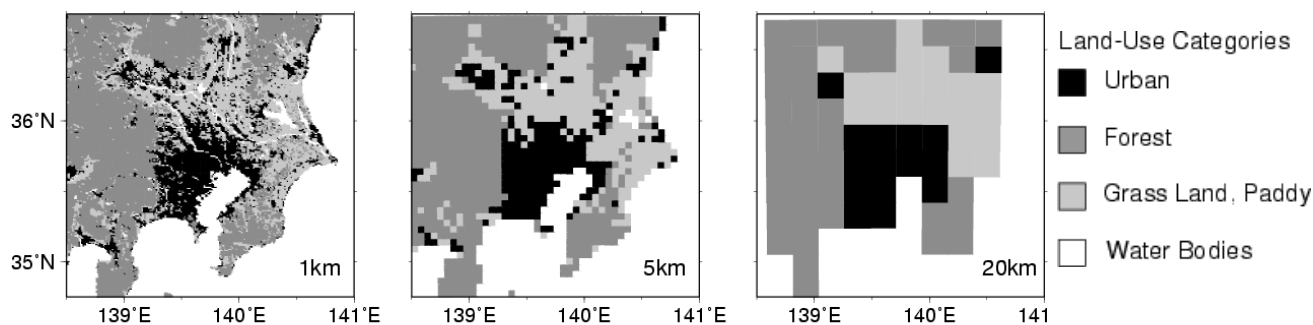


図 1 首都圏の土地利用分布。左から 1 km, 5 km, 20 km メッシュデータを用いた場合。日下・原⁽³⁾より引用 (一部改変)。

表 1 都市域を対象とした温暖化ダウンスケーリングに関する先行研究および本研究の概要。

先行研究	GCM	RCM (分解能)	Sc*	年代	積分 期間	月	対象 地域	おもな内容
原ほか ⁽⁸⁾	MIROC	WRF (3 km)	A2	2070	1 ヶ月 (1 年)	12 月	東京	・ 2070 年代の夜間の UHII は 2000 年代に比べて約 20%以上強まる
飯塚ほか ⁽¹²⁾⁽¹³⁾	MIROC	WRF (1 km)	A2	2070	1 ヶ月 (1 年)	8 月	名古屋	・ 2070 年代の名古屋の平均気温は 2000 年代に比べて約 3°C 昇温 ・ ヒートアイランド対策の効果を調査
Kusaka et al. ⁽¹⁴⁾	MIROC MRI CSIRO	WRF (3 km)	A1b	2070	1 ヶ月 (10 年)	8 月	東京 名古屋 大阪	・ 2070 年代の首都圏の平均気温は 2010 年の平均気温と同程度になる ・ GCM による地上気温の予測結果の不確実性は 1.2°C ・ 健康影響評価を実施
Adachi et al. ⁽¹⁵⁾	BCCR CSIRO GFDL INGV MRI	RAMS (3 km)	A1b	2070	1 ヶ月 (7 年)	8 月	東京	・ 2000 年代から 2070 年代にかけての地上気温の上昇に気候変動が 2°C、都市化が 0.5°C 寄与 ・ 気候変動に伴う気温上昇量は GCM によって不確実性が 2°C 程度ある
本研究	MIROC	WRF (3 km)	A2	2070	1 ヶ月 (10 年)	8 月	東京 名古屋 大阪	・ MIROC を用いた場合、A2 と A1b のシナリオによる地上気温の予測結果の不確実性の評価 (Kusaka et al. ⁽¹⁴⁾ との比較) ・ UHII の将来変化の調査 (原ほか ⁽⁸⁾ との比較)

※Sc: 排出シナリオ

Kusaka et al.⁽¹⁴⁾ は夏季の三大都市圏の 2070 年代の気候予測実験を、空間分解能 3 km の WRF-UCM を用いて実施した。彼らは、8 月の気候値を算出するために、2000 年から 2009 年までの 8 月を対象に、1 ヶ月積分を 10 年分を行った。彼らは WRF の初期値・境界値として、SRES A1b シナリオ（高成長社会シナリオ。化石エネルギーや非化石エネルギー等、各エネルギー源のバランスを重視）下での将来気候予測実験の結果（3 つの異なる GCM：MRI, MIROC, CSIRO による予測結果）を使用した。Kusaka et al.⁽¹⁴⁾ と同様に Adachi et al.⁽¹⁵⁾ は、SRES A1b シナリオに基づいた 5 つの GCM の予測結果を用いて首都圏の将来予測実験を実施している。以上のように、近年、都市圏を表現できるくらい解像度の高い RCM を用いて都市気候の将来予測実験が行われ始めているが、全球を対象とした GCM による将来予測実験や日本全域を対象とした RCM による将来予測実験に比べると、はるかに少ない。

近年、特に日本の三大都市圏（首都圏、大阪都市圏、名古屋都市圏）において夏季の気温が上昇している⁽¹⁶⁾。現在から将来にかけて都市域の高温化対策を策定する上で、将来、全球規模で見たときに最も高温になりやすい IPCC 排出シナリオに基づき、日本の都市圏が将来最大でどの程度高温化するかを見積もることは重要である。現在のところ、将来最も高温となることが予測されている IPCC 排出シナリオは SRES A2 シナリオである⁽¹⁰⁾。将来の気温上昇量はシナリオだけでなく、GCM にも依存する。将来の日本付近の気候を最も高温に予測する傾向がある GCM は MIROC と言われている⁽¹⁰⁾⁽¹⁴⁾（RCM による予測結果は、初期値・境界値とする GCM の影響を強く受けることが知られている）。SRES A2 シナリオに基づいた MIROC の将来予測結果を RCM の初期値・境界値として用い、領域気候の将来予測を行った研究は飯塚ほか⁽¹²⁾⁽¹³⁾ がある。しかしながら前述したように、積分期間がある特定の 1 年の 1 ヶ月のみであるため、将来の気候値は予測されていない。

本研究では、Kusaka et al.⁽¹⁴⁾ と同様に三大都市圏を対象に、これまでほとんど行われてこなかった都市気候の将来予測実験を、高分解能の RCM の一つである WRF-UCM を用いて実施する。WRF-UCM の初期値・境界値には、将来最も高温となることが予測されている SRES A2 シナリオに基づき将来予測を行った MIROC の結果を使用する。

2. 2000 年代夏季の気候の再現実験

2.1 計算設定

本研究では領域気候モデル WRF Version 3.0.1⁽⁹⁾ を用いて 2000 年代夏季の再現実験を行う。WRF モデルの詳細については、Skamarock et al.⁽⁹⁾ や日下⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾ を参照されたい。図 2 は計算対象領域である。第 1 領域の水平格子間隔は 27 km、第 2 領域は 9 km、第 3 領域 3 km とする。解析には第 3 領域の結果を使用する。モデルの上限は 50 hPa 高度であり鉛直総数は 31 層である。初期値・境界値には 6 時間毎の

NCEP-Final analysis (FNL) データと RTG-SST データを使用する。土地利用および標高データは国土地理院のデータセット（100 m 解像度）を使用する。計算期間は Kusaka et al.⁽¹⁴⁾ と同様に、2000 年代（2000-2009 年）の 8 月である。

数値実験では、Dudhia 短波放射モデル⁽¹⁹⁾、RRTM 長波放射モデル⁽²⁰⁾、WSM3 雲微物理モデル⁽²¹⁾、YSU 境界層モデル⁽²²⁾⁽²³⁾、Noah LSM⁽²⁴⁾ と UCM⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾ を使用する。UCM を使用することによって、建物の存在による放射冷却の緩和・建物間での放射の反射・風速の低下など都市気象特有の特徴を考慮することができる⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。また、UCM を導入することによって、ある晴天日における都市の気象の再現精度が高くなるだけでなく、気候の再現精度、すなわち地上気温等の空間分布や時間変化、頻度分布の再現精度も高まることが示されている⁽²⁸⁾。UCM のパラメータである都市の配置や都市内の緑被率、人工排熱量は Kusaka et al.⁽¹⁴⁾ と同様に首都圏の平均値を使用する（計算領域内の全ての都市においてこれらのパラメータを使用しているため、本研究の計算では実際に都市内に存在するビル間の高低差や街区による建蔽率の差等は考慮されていない）。なお、第 1 領域と第 2 領域の計算には、Kain-Fritsch 積雲パラメタリゼーションスキーム⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾ を使用する。以上の設定のもとで行う計算を本論文では CTRL と呼ぶ（表 2）。

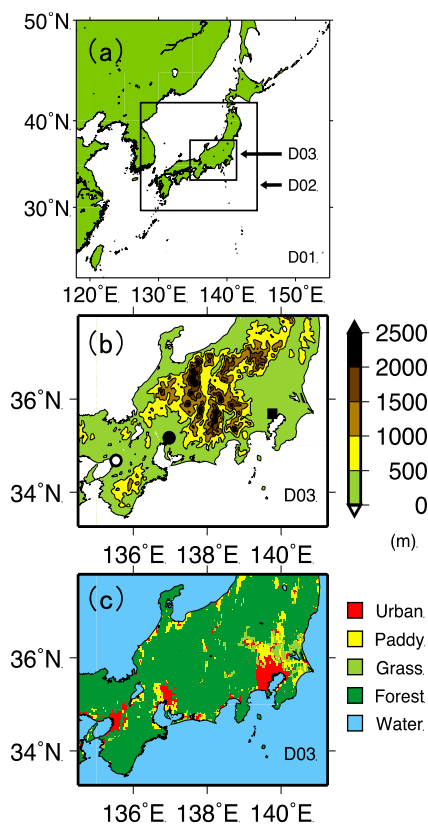


図 2 対象領域の地形と土地利用区分。(a) WRF の第 1 領域 (D01)、第 2 領域 (D02)、第 3 領域 (D03)。(b) D03 の地形と (c) 土地利用区分。黒四角は東京、黒丸は名古屋、白丸は大阪の位置である。

表2 数値実験の設定

case	擬似温暖化	都市域
CTRL	なし	あり
CTRL_NU	なし	なし(草地に変更)
PGW	あり	あり
PGW_NU	あり	なし(草地に変更)

2.2 結果

図 3a, b は気象庁の AMeDAS によって観測された 2000 年代の地上気温の水平分布である。5 時に三大都市と中心とした広域ヒートアイランドが出現している (図 3a)。14 時には、沿岸域の三大都市だけではなく内陸域の地域も高温となっている (図 3b)。これらの地上気温の分布を、WRF-UCM モデルは良好に再現できている (図 3c, d)。

図 4 は練馬・名古屋・大阪で観測、計算された地上気温の時間変化である。観測された 5 時の気温は三大都市の中で大阪が最も高く (26.2°C)、次いで名古屋が高い (25.1°C)。

練馬の 5 時の気温は三大都市の中では最も低い (24.5°C)。14 時の気温は、5 時の気温と同様に大阪が最も高く (32.2°C)、次いで名古屋 (31.8°C)、練馬 (30.8°C) である。WRF-UCM モデルは、このような各時刻における気温の地域差を含め、各地点の時間変化を良好に再現できている。地上気温の平均誤差 (CTRL-観測) は、練馬で-0.3°C、名古屋で-0.1°C、大阪で-0.5°C である。

WRF モデルによって計算された 2000 年代の三大都市における地上気温の頻度分布を図 5 に示す。練馬では 24°C から 27°C の頻度が異なるものの、計算された頻度分布は観測された頻度分布と全体として良く合っている (図 5a)。WRF-UCM モデルは名古屋と大阪の頻度分布も良好に再現している (図 5b, c)。以上の結果より、WRF-UCM モデルは三大都市圏の気候を良好に再現できるパフォーマンスを有していることがわかる。

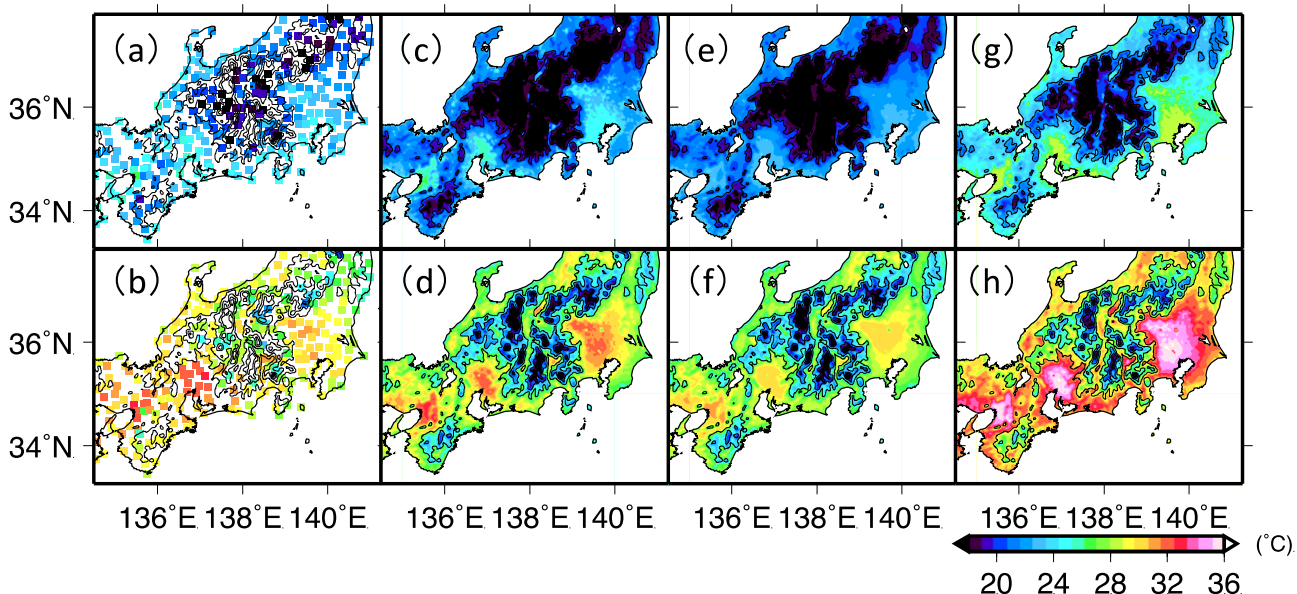


図3 地上気温の水平分布。(a, b) 観測, (c, d) CTRL, (e, f) CTRL_NU, (g, h) PGW。上段は5時, 下段は14時の結果。

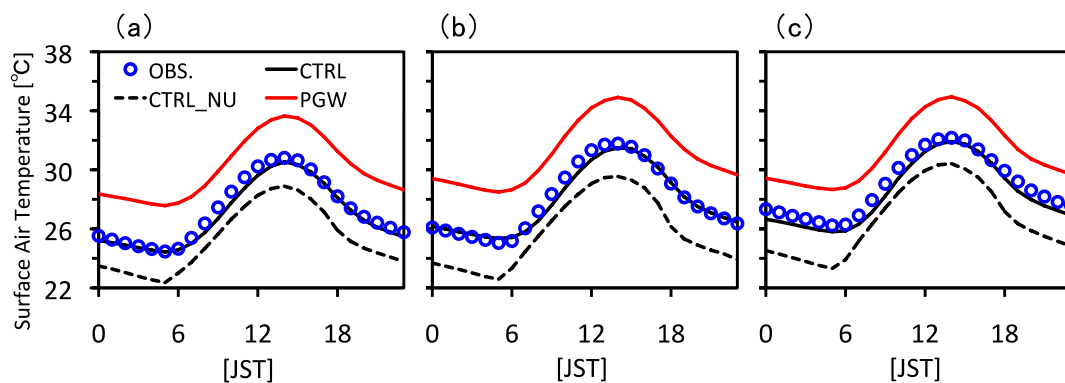


図4 地上気温の時間変化。(a) 練馬, (b) 名古屋, (c) 大阪。青丸は観測値, 黒実線は CTRL, 黒破線は CTRL_NU, 赤実線は PGW の結果。

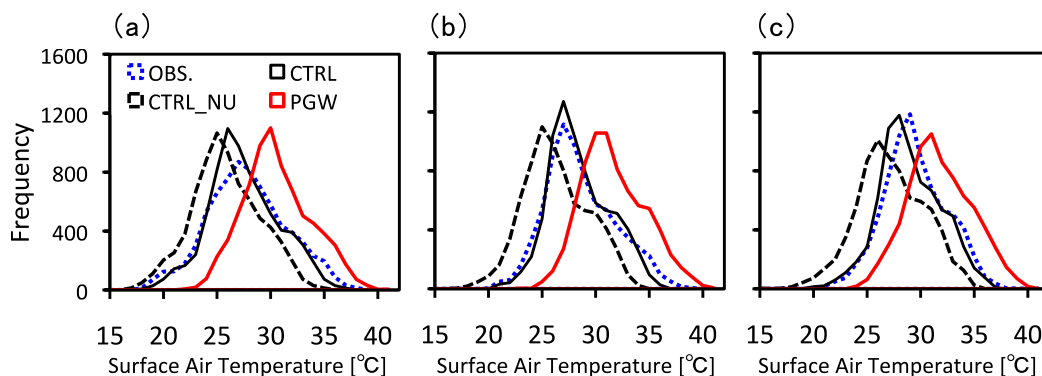


図 5 地上気温の頻度分布。(a) 練馬, (b) 名古屋, (c) 大阪. 青点線は観測値, 黒実線は CTRL, 黒破線は CTRL_NU, 赤実線は PGW の結果.

2.3 都市無し実験 (CTRL_NU)

ここでは, 都市域を対象とした力学的ダウンスケーリングにおいて, 都市の存在を考慮する重要性を示すために, 図 2c で示した土地利用区分が都市である領域を草地に変更した数値実験 (CTRL_NU; 表 2) を行う.

CTRL_NU の計算結果を図 3e, f に示す. CTRL_NU による 5 時と 14 時の気温は, 観測や観測を良好に再現していた CTRL の結果に比べて 5 時と 14 時ともに低くなっている. 図 4 は CTRL_NU の地上気温の時間変化である. 練馬, 名

古屋, 大阪の全ての時刻において CTRL_NU の気温は観測と CTRL に比べて 2°C 前後低い (表 3). また CTRL_NU による地上気温の頻度分布は, 観測や CTRL に比べて低温側にずれている (図 5). この結果は, 都市気候を対象としてダウンスケーリング実験を行う際には, 単に高解像度の RCM を使用するだけでなく, 都市の存在を考慮する (具体的には UCM を RCM と合わせて使用する) 重要性を示している.

表 3 練馬・名古屋・大阪における (a) 平均気温, (b) 5 時の気温, (c) 14 時の気温の計算ケース間の差. 括弧内の数字は各ケースの気温の絶対値.

(a)	平均気温の差	練馬	名古屋	大阪
	PGW-CTRL (°C)	+3.2 (30.1-26.9)	+3.3 (31.2-27.9)	+2.9 (31.3-28.4)
	CTRL-CTRL_NU (°C)	+1.7 (26.9-25.2)	+2.2 (27.9-25.7)	+1.8 (28.4-26.6)
	PGW-PGW_NU (°C)	+1.8 (30.1-28.3)	+2.2 (31.2-29.0)	+1.9 (31.3-29.4)
(b)	5 時の気温の差	練馬	名古屋	大阪
	PGW-CTRL (°C)	+3.1 (27.5-24.4)	+3.2 (28.5-25.3)	+2.9 (28.7-25.8)
	CTRL-CTRL_NU (°C)	+2.1 (24.4-22.3)	+2.8 (25.3-22.5)	+2.5 (25.8-23.3)
	PGW-PGW_NU (°C)	+2.2 (27.5-25.3)	+2.9 (28.5-25.6)	+2.7 (28.7-26.0)
(c)	14 時の気温の差	練馬	名古屋	大阪
	PGW-CTRL (°C)	+3.1 (33.6-30.5)	+3.4 (34.9-31.5)	+3.0 (34.9-31.9)
	CTRL-CTRL_NU (°C)	+1.6 (30.5-28.9)	+1.9 (31.5-29.6)	+1.5 (31.9-30.4)
	PGW-PGW_NU (°C)	+1.8 (33.6-31.8)	+1.9 (34.9-33.0)	+1.8 (34.9-33.1)

3. 2070 年代夏季の気候の予測実験

3.1 計算設定

2070 年代の夏季の気候を予測する手法として, 擬似温暖化 (Pseudo Global Warming: PGW) 手法⁽³¹⁾⁽³²⁾を使用する. 本研究では, 原ほか⁽⁸⁾ や飯塚ほか⁽¹²⁾⁽¹³⁾ と同様に, 6 時間毎の再解析データ (本研究の場合は FNL データ) に長期間平均を行った気候変化成分を加えたものを, WRF モデルの

初期値・境界値とする. 本研究で使用した気候変化成分は, CMIP3 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 3) から MIROC 3.2 medres⁽¹¹⁾による SRES A2 シナリオのうち, 現在気候として 1990-1999 年, 将来気候として 2070-2079 年を想定し, それらの 8 月月平均値の差である. PGW 手法の利点は, 領域気候モデルの初期値・境界値となる全球気候モデルが持つバイアスを低減させることと, 一般的な力学的ダウンスケーリングに比べて計算コストが低いことにある.

一方で、月平均では表現できない短い時間スケールでの擾乱、たとえば台風や温帯低気圧の数・強さ・経路などの将来変化を考慮することができないなどの欠点もある⁽⁹⁾。擬似温暖化手法の詳細は、Kimura and Kito⁽³¹⁾、佐藤⁽³²⁾、Kusaka et al.⁽¹⁴⁾ や解説書（日下・原⁽³⁾など）を参照されたい。以上の設定のもとで行う擬似温暖化計算を、本論文では PGW と呼ぶ（表 2）。なお、PGW における土地利用や UCM のパラメータである都市の配置、都市内の緑被率、人工排熱量は CTRL と同様のものを使用する。このような仮定をする理由は、現在において三大都市圏の面積が十分拡大していることや、今後 70 年間で経済の急激な発展や人口の急増が予想されていないためである。

3.2 結果

WRF モデルによって計算された 2070 年代の地上気温の水平分布を図 3g, h に示す。2000 年代と同様に 5 時に三大都市圏において、気温が周辺よりも高くなる広域ヒートアイランドが発生していることがわかる（図 3g）。2070 年代の 5 時の気温は 2000 年代に比べて練馬で 3.1°C 高い 27.5°C、名古屋では 3.2°C 高い 28.5°C、大阪では 2.9°C 高い 28.7°C となっている（表 3）。14 時には、2000 年代と同様に三大都市の内陸域で最も高温となっている（図 3h）。2070 年代の 14 時の気温は 2000 年代に比べて練馬で 3.1°C 高い 33.6°C、名古屋で 3.4°C 高い 34.9°C、大阪で 3.0°C 高い 34.9°C となっている（表 3）。

2070 年代と 2000 年代の気温の時間変化を比べると、2070 年代の気温が 2000 年代に比べて時刻を問わず一律に 3°C 程度高いことがわかる（図 4）。2070 年代の地上気温の頻度分布の形は、練馬、名古屋、大阪ともに 2000 年代の形と良く似ている（図 5）。2070 年代の気温の平均値は 2000 年代に比べて練馬では 3.2°C、名古屋では 3.3°C、大阪では 2.9°C 高くなっている（表 3a）。

3.3 SRES A1b シナリオとの比較

ここでは本研究で実施した PGW の結果と、Kusaka et al.⁽¹⁴⁾ により実施された SRES A1b シナリオ下で実施された結果を比較する。1 章で述べたように、本研究で採用した SRES A2 は将来最も高温となることが予測されているシナリオである。

2070 年代と 2000 年代の地上気温の差（以後、気温上昇量）の比較結果を図 6 に示す。A2 シナリオ下で実施された PGW の結果、練馬の気温上昇量は 3.2°C であった。A1b シナリオでの計算では気温上昇量は 2.8°C である。両者の差は 0.4°C である。名古屋における A2 と A1b シナリオの気温上昇量の差は 0.4°C、大阪では 0.3°C である。このように A2 と A1b シナリオに基づいたダウンスケーリングの気温上昇量に大きな地域性は見られない。

3.4 2000 年代と 2070 年代のヒートアイランド強度(UHII)の比較

2.3 章にて CTRL_NU を行った。本研究では CTRL と CTRL_NU の気温差を、UHII_CTRL と呼ぶ。同様に、2070 年代においても土地利用区分が都市である領域を草地に変更した数値実験(PGW_NU; 表 2)を行う。PGW と PGW_NU の気温差を UHII_PGW と呼ぶ。

UHII_CTRL は、三大都市のいずれの地点でも 5 時に最大となり、7 時前後に最小となっている（図 7）。ただし、UHII_CTRL の値は三大都市で異なっている。5 時の UHII_CTRL は練馬で+2.1°C、名古屋で+2.8°C、大阪で+2.5°Cである（表 3b）。14 時の UHII_CTRL は練馬で+1.6°C、名古屋で+1.9°C、大阪で+1.5°Cである（表 3c）。UHII_PGW の時間変化は、UHII_CTRL と概ね一致している。この結果は、UHII が 2000 年代から 2070 年代にかけてほとんど変化しないことを意味している。UHII_CTRL と UHII_PGW の差が小さかった理由として、将来予測の手法として PGW 手法を使用したことが挙げられる。すなわち、PGW 手法を使用したことによって、月平均では表現できない短い時間スケールでの擾乱、たとえば台風や温帯低気圧の数・強さ・経路などの将来変化を考慮することができなくなり（2070 年代における擾乱の発生数等が 2000 年代と同等になり）、その結果、ヒートアイランドの形成に重要な晴天日数等に 2000 年代と 2070 年代で大きな差が生じなかったと推察される。

原ほか⁽⁸⁾ は、冬季の 1 ヶ月を対象に練馬における 2000 年代と 2070 年代の UHII の変化を調べた。その結果、2070 年代の UHII は 2000 年代のものに比べて最大 0.5°C 程度大きくなることを示した。本研究による UHII_CTRL と UHII_PGW の差が小さいという上記の結果は、この原ほか⁽⁸⁾ の結果とは異なる。結果が異なった要因の一つとして、原ほか⁽⁸⁾ が冬期を対象とした実験であることや、特定の 1 年の 1 ヶ月のみしか計算していないことが考えられるが、この結果の違いの考察は今後の課題としたい。

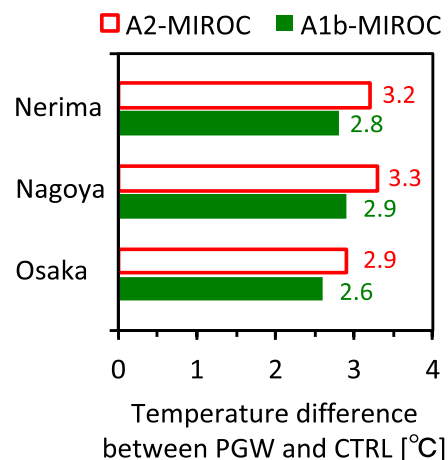


図 6 練馬・名古屋・大阪における 2070 年代と 2000 年代の地上気温の差 (PGW-CTRL)。赤棒は A2-MIROC、緑棒は A1b-MIROC の結果。A1b-MIROC の結果は Kusaka et al.⁽¹⁴⁾ から引用。

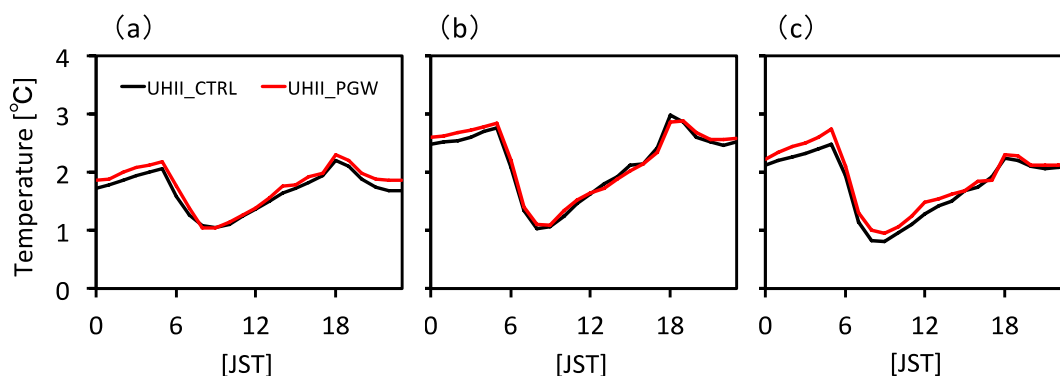


図7 ヒートアイランド強度 (UHII) の気温差の時間変化. (a) 練馬, (b) 名古屋, (c) 大阪. 黒実線は2000年代のUHII (UHII_CTRL), 赤実線は2070年代のUHII (UHII_PGW) の結果.

UHII_CTRL と UHII_PGW に地点差がある理由, すなわち, 5時のUHII_CTRLとUHII_PGWは名古屋が最大で, 練馬が最も小さい理由は, 都市の形状や人工排熱といったUCMのパラメータが三大都市圏で同じ値に設定してあること(2.1章)から, 平野とそれを取り囲む山地や湾といった地理的な条件によって生じたものと推察される. しかしながら, この問題の追求はヒートアイランド研究そのものの課題であり, 本論文の課題と異なる. 本論文では, 上記の課題が存在する可能性があるという提起に留めておく.

4. まとめ

都市圏を表現できるくらい解像度の高いRCMを用いて都市気候の将来予測実験を行った研究は, 全球を対象としたGCMによる将来予測実験や日本全域を対象としたRCMによる将来予測実験に比べるとはるかに少ない. 本研究では, 三大都市圏を対象に, これまでほとんど行われてこなかった都市気候の将来予測実験を, 高分解能のRCMの一つであるWRF-UCMを用いて実施した. WRF-UCMの初期値・境界値には, 将来最も高温となることが予測されているSRES A2シナリオに基づき将来予測を行ったMIROCの結果を使用した. 主な結果を以下にまとめる.

- (1) WRF-UCMは, 2000年代の5時における三大都市圏の広域ヒートアイランドや, 14時における三大都市圏の内陸域の高温といった気温分布を良好に再現できていた. 練馬, 名古屋, 大阪における地上気温の時間変化の再現性も良好であった. 地上気温の平均誤差(CTRL-観測)は, 練馬で -0.3°C , 名古屋で -0.1°C , 大阪で -0.5°C であった. さらに, 2000年代の三大都市における地上気温の頻度分布の再現性も良好であった. WRF-UCMモデルは三大都市圏の気候を良好に再現できるパフォーマンスを有していることがわかった.
- (2) 土地利用区分が都市である領域を草地に変更した数

値実験(CTRL_NU)の結果, 練馬, 名古屋, 大阪の全ての時刻においてCTRL_NUは地上気温を, 観測とCTRLの地上気温に比べて 2°C 前後低く計算することがわかった. この結果は, 都市気候を対象としてダウンスケーリング実験を行う際には, 単に高解像度のRCMを使用するだけでなく, 都市の存在を考慮する(具体的にはUCMをRCMと合わせて使用する)重要性を示している.

- (3) 2070年代の5時には2000年代と同様に三大都市圏に広域ヒートアイランドが出現した. 2070年代の5時の気温は2000年代に比べて練馬で 3.1°C 高い 27.5°C , 名古屋では 3.2°C 高い 28.5°C , 大阪では 2.9°C 高い 28.7°C であった. 14時には, 2000年代と同様に三大都市の内陸域で最も高温となっていた. 2070年代の14時の気温は2000年代に比べて練馬で 3.1°C 高い 33.6°C , 名古屋で 3.4°C 高い 34.9°C , 大阪で 3.0°C 高い 34.9°C であった. 2070年代と2000年代の気温の時間変化を比べると, 2070年代の気温が2000年代に比べて時刻を問わず一律に 3°C 程度高い結果が得られた.
- (4) 本研究で実施したPGW(SRES A2シナリオ)の結果と, Kusaka et al.⁽¹⁴⁾により実施されたSRES A1bシナリオ下で実施された結果を比較した. A2シナリオ下で実施されたPGWの結果, 練馬の気温上昇量は 3.2°C であったが, A1bシナリオでの計算では気温上昇量は 2.8°C であり, 両者の差は 0.4°C であった. 名古屋におけるA2とA1bシナリオの気温上昇量の差は 0.4°C , 大阪では 0.3°C であった. SRESによるシナリオは, ダウンスケーリング後の都市域の気温にも影響することがわかった. この結果は, 今後複数のシナリオに基づいてダウンスケーリングを進める必要があることを示唆している. A2とA1bシナリオに基づいたダウンスケーリングの気温上昇量に大きな地域性は見られなかった.
- (5) 2000年代のヒートアイランド強度(UHII_CTRL)と2070年代のヒートアイランド強度(UHII_PGW)を比較した. その結果, UHII_CTRLの各時刻の絶対値

と時間変化は UHII_PGW のものとおおむね同じであることがわかった。この結果は、UHII が 2000 年代から 2070 年代にかけてほとんど変化しないことを意味している。UHII_CTRL と UHII_PGW の差が小さかった理由として、擬似温暖化手法を使用したことによって 2070 年代における擾乱の発生数等が 2000 年代と同等になり、その結果、2000 年代と 2070 年代でヒートアイランドの形成に重要な晴天日数等に大きな差が生じなかったことが考えられる。本研究による UHII_CTRL と UHII_PGW の差が小さいという上記の結果は、原ほか⁽⁸⁾による冬季の都市気候の計算結果とは異なっていた。

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」において実施されたものである。本研究の一部は、環境省の環境研究総合推進費 (S-8) の支援により実施された。本研究で実施された数値シミュレーションは、筑波大学計算科学研究センター学際共同利用プログラムの支援を受けた。

参考文献

- (1) M. P. McCarthy, M. J. Best and R. A. Betts, Climate change in cities due to global warming and urban effects, *Geophys. Res. Lett.*, 37 (2010), L09705.
- (2) K. W. Oleson, G. B. Bonan, J. Feddema and T. Jackson, An examination of urban heat island characteristics in a global climate model, *Int. J. Clim.*, 31 (2011), pp.1848-1865.
- (3) 日下博幸・原政之, 温暖化のダウンスケーリング, 二つの温暖化—地球温暖化とヒートアイランド—, (2012), 成山堂書店.
- (4) R. E. Dickinson, R. M. Errico, F. Giorgi and G. T. Bates, A regional climate model for the western U.S. *Climatic Change*, 15 (1989), pp.383-422.
- (5) F. Giorgi and T. Bates, The climatological skill of a regional model over complex terrain. *Mon. Wea. Rev.*, 117 (1989), pp.2325-2347.
- (6) N. Ishizaki, N. I. Takayabu, M. Oh'izumi, H. Sasaki, K. Dairaku, S. Iizuka, F. Kimura, H. Kusaka, S. A. Adachi, K. Kurihara, K. Murazaki and K. Tanaka, Improved performance of simulated Japanese climate with a multi-model ensemble. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 90(2) (2012), pp.235-254.
- (7) N. Ishizaki, H. Shiogama, K. Takahashi, S. Emori, K. Dairaku, H. Kusaka, T. Nakaegawa, I. Takayabu, An Attempt to Estimate of Probabilistic Regional Climate Analogue in a Warmer Japan. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 90B (2012), pp.65-74.
- (8) 原政之・日下博幸・木村富士男・若月泰孝, 気候変動が首都圏の都市ヒートアイランドに及ぼす影響—冬季を対象として—, *ながれ*, 29 (2010), pp.353-361.
- (9) W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang and J. G. Powers, A description of the advanced research WRF version 3, NCAR/TN-475pSTR, (2008), 126 pp.
- (10) IPCC, Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, S. Solomon et al., Eds., Cambridge University Press, (2007), 996 pp.
- (11) T. Nozawa, T. Nagashima, T. Ogura, T. Yokohata, N. Okada and H. Shiogama, 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).
- (12) 飯塚悟・金原和矢・日下博幸・原政之・秋本祐子, 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)—, *日本建築学会環境系論文集* 75 (2010), pp.87-93.
- (13) 飯塚悟・金原和矢・日下博幸・原政之, 2070 年代夏季温熱環境の長期トレンド予測—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 2)—, *日本建築学会環境系論文集* 76 (2011), pp.425-430.
- (14) H. Kusaka, M. Hara and Y. Takane, Urban climate projection by the WRF model at 3-km horizontal grid increment: Dynamical downscaling and predicting heat stress in the 2070's August for Tokyo, Osaka, and Nagoya metropolises, *J. Meteor. Soc. Japan*, 90B (2012), pp.47-63.
- (15) S. A. Adachi, F. Kimura, H. Kusaka, T. Inoue and H. Ueda, Comparison of the impact of global climate changes and urbanization on summertime future climate in the Tokyo metropolitan area, *J. Appl. Meteor. Clim.*, 51 (2012), pp.1441-1454.
- (16) 藤部文昭, 日本における近年の著しい夏季高温の発生状況, *地理学評論*, 51 (2004), pp.119-132.
- (17) 日下博幸, 領域気象モデル WRF について, *ながれ*, 28 (2009), pp.3-12.
- (18) 日下博幸, 領域気象モデル WRF の都市気候研究への応用と課題, *地学雑誌*, 120 (2011), pp.285-295.
- (19) J. Dudhia, Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, *J. Atmos. Sci.*, 46 (1989), pp.3077-3107.
- (20) E. J. Mlawer, S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono and S. A. Clough, Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, *J. Geophys. Res.*, 102 (D14)(1997), pp.16663-16682.
- (21) S.-Y. Hong, J. Dudhia and S.-H. Chen, A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of

- clouds and precipitation, *Mon. Wea. Rev.*, 132 (2004), pp.103-120.
- (22) S.-Y. Hong and H.-L. Pan, Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model, *Mon. Wea. Rev.*, 124 (1996), pp.2322-2339.
- (23) S.-Y. Hong, Y. Noh and J. Dudhia, A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes, *Mon. Wea. Rev.*, 134 (2006), pp.2318-2341.
- (24) F. Chen, and J. Dudhia, Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity, *Mon. Wea. Rev.*, 129 (2001), pp.569-585.
- (25) H. Kusaka, H., H. Kondo, Y. Kikegawa and F. Kimura, A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multilayer and slab models, *Bound.-Layer Meteor.*, 101 (2001), pp.329-358.
- (26) H. Kusaka and F. Kimura, Coupling a singlelayer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case, *J. Meteor. Soc. Japan*, 82 (2004), pp.67-80.
- (27) H. Kusaka and F. Kimura, Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island: Numerical experiment using mesoscale model coupled with urban canopy model, *J. Appl. Meteor.*, 43 (2004), pp.1899-1910.
- (28) H. Kusaka, F. Chen, M. Tewari, J. Dudhia, D. O. Gill, M. G. Duda, W. Wang and Y. Miya, Numerical simulation of urban heat island effect by the WRF model with 4-km grid increment: An inter-comparison study between the urban canopy model and slab model, *J. Meteor. Soc. Japan*, 90B (2012), pp.33-45.
- (29) J. S. Kain and J. M. Fritsch, A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization, *J. Atmos. Sci.*, 47 (1990), pp.2784-2802.
- (30) J. S. Kain, The Kain-Fritsch convective parameterization: An update, *J. Appl. Meteor.*, 43 (2004), pp.170-181.
- (31) F. Kimura and A. Kitoh, Downscaling by pseudo global warming method, The Final Report of the ICCAP, Research Institute for Humanity and Nature, Kyoto, Japan (2007).
- (32) 佐藤友徳, 新用語解説 擬似温暖化実験, *天気*, 57 (2010), pp.306-307.

(Received Oct 26, 2012, Accepted Nov 29, 2012)