

# 領域気候・都市気候・建物エネルギー連成数値モデルの 首都圏における街区レベルの電力需要量の再現精度

Reproducibility of city-block scale electricity consumption in Tokyo Metropolitan Area simulated by a regional climate model coupled with a building energy model

中島 虹<sup>\*1</sup>・高根雄也<sup>\*1</sup>・亀卦川幸浩<sup>\*2</sup>・山口和貴<sup>\*3</sup>

## 1. はじめに

世界の人口の50%以上は都市に集中しており、エネルギーの約75%が都市で消費されている<sup>1)</sup>。人間活動により消費されるエネルギーは人工排熱として大気に排出され、都市気候に影響を及ぼす。人工排熱が大気に排出されると、地表付近の気温は1-3°C上昇し得る<sup>2)</sup>。このような人工排熱は、都市の極端な高温現象や、健康被害を増加させる可能性がある。それゆえ正確かつ頑健な人工排熱の評価が必要である。

人工排熱には建築物からの排熱、自動車排熱、産業排熱などが挙げられる。そのうち、建物からの排熱には空調が大きく関与する。空調に使用されるエネルギーの多くは電力であり、電力需要量は気象による影響を受ける。Figure 1は気温と電力需要量の関係を示した図である。気温が気温分岐点( $T_s$ )を超えると、電力需要量はほぼ線形に上昇する。この電力需要量の増加分は空調需要量の増加によるものとみなされる<sup>3,4)</sup>。そのため、建物からの排熱は気象の影響を強く受ける。この建物からの排熱と都市気象の関係を加味した複数の数値モデルが開発されてきた<sup>5,6)</sup>。これらの数値モデルでは建物の電力およびガスの需要量を計算し、これらの需要量を元に建物からの排熱量を推計する。そのため、モデルの改良・発展のためにはモデルで計算されるこれらのエネルギー需要量を実データと検証する必要があるが、これまでも数多くの検証がなされてきた<sup>3,9)</sup>。

しかし、これまでの検証研究には以下で示すように、実データの水平解像度の面で課題があった。数値モデルでは水平解像度数 $\text{km}^2$ でエネルギー需要量を推定する。それに対して検証に用いられてきた実データは、地方レベルの広域なエネルギー需要量

であり、その水平解像度はモデルと比較して非常に粗い( $>100\text{km}^2$ )<sup>3,4,6)</sup>。この実データとモデルの空間解像度の違いを解決するため、既往研究では、実データの領域に合わせてモデルの各格子で計算されたエネルギー需要量を積算して実データと比較するもの<sup>3,4)</sup>や、実データを人口などで按分(ダウンスケール)し、モデル計算値と比較した検証<sup>6)</sup>がなされてきた。そのため、積算や按分による不確実性が含まれていた。このように、モデルが数 $\text{km}^2$ でエネルギー需要量を計算可能であっても、同程度の水平解像度の実データとの比較検証は不足している。また、モデルの空間解像度と同程度の実データを用いた場合でも、実データの領域は計算対象範囲の限られた街区である<sup>7-9)</sup>。以上の点から、数値モデルのエネルギー需要量の検証は不十分である。

また、これまでの検証研究では熱波や連続した晴天日などの数日間を検証期間とする場合が多い<sup>3,4)</sup>。エネルギー需要量は日々の気温によって変動する(Fig. 1)。そのため、気温変化に対するエネルギー需要量の変化(気温感応度)がモデルで正しく再現されていることを検証する必要があるが、このことを実データから検証した例はいまだ少ない。気温感応度の精度を検証することは、地球温暖化がエネルギー需要量の変化へ及ぼす影響を評価・予測するためにも重要である。

本研究では領域気候・都市気候・建物エネルギー連成数値モデル(WRF-CM-BEM)<sup>7)</sup>により計算される夏季エネルギー需要量を、電力需要量に着目して検証することを目的とする。検証にはモデルの空間解像度( $1\text{km}^2$ )に即した空間解像度(数 $\text{km}^2$ )で

<sup>1)</sup> 産業技術総合研究所

<sup>2)</sup> 明星大学

<sup>3)</sup> 東京電力ホールディングス株式会社

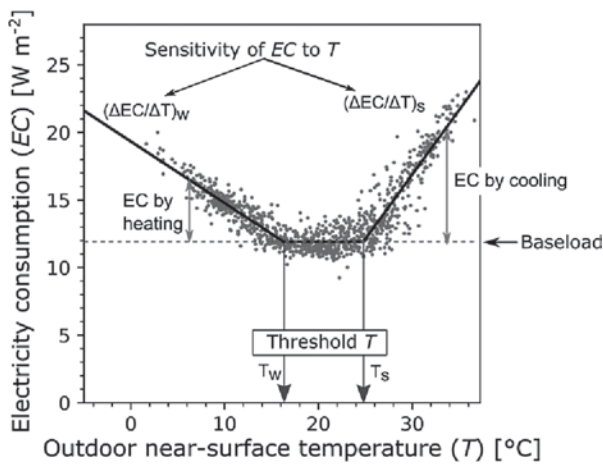


Fig. 1 Relationship between electricity consumption and outdoor near-surface temperature at 1500 JST during weekdays at one substation. Black solid line is the regression line. MAPE : Mean absolute percentage error.

首都圏を網羅した電力データを用いた。

## 2. データと手法

### 2.1 データ

東京電力管内における配電用変電所エリア毎の2015年4月1日から2019年12月31日の時刻別電力需要量<sup>10)</sup>を利用した。Figure 2aに配電用変電所エリアの分布図<sup>10)</sup>を示す。特に東京23区内における空間解像度は高く、エリア面積の平均は1.8km<sup>2</sup>であり、モデルの解像度(約1km<sup>2</sup>)と整合する。異なるエリア面積での電力需要量を比較するために、各変電所ごとの延床面積を、ESRI ジャパン株式会社より商業的に配布されている「ArcGIS Geo Suiteの詳細地図2020」を用いて集計した。そして、各変電所における単位延床面積当たり電力需要量を算出することで解析に用いた。また、気象庁の気象官署およびAMeDASにおける時間値を気象庁ホームページから取得した。

### 2.2 モデル概要

本研究では、領域気候モデル(WRF)に都市キャノピーモデル(CM)と建物エネルギー・建物エネルギーモデル(CM-BEM<sup>5)</sup>)を結合したWRF-CM-BEM<sup>7)</sup>を用いた。WRF-CM-BEMによる建物内部でのエネルギーの計算過程の概念図をFig. 3に示す。このモデルは建物内部における非空調由来の電力需要量(以下、ベースロード(Fig. 1))やガス需要量、人体発熱に伴う内部発熱と、建物外部からの熱の流入から、建物内部で発生する空調熱負荷を計算する。この空調熱負荷を処理するために必要な空調電力需要量と空調ガス需要量を計算する。そして、

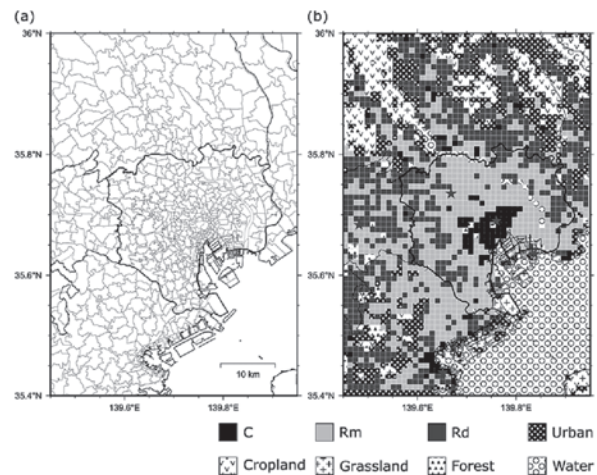


Fig. 2 (a) Distributional boundaries of substations. (b) Distributions of land-use categories. C : Commercial and office buildings, Rm : Multiple residential, Rd : Detached residential.

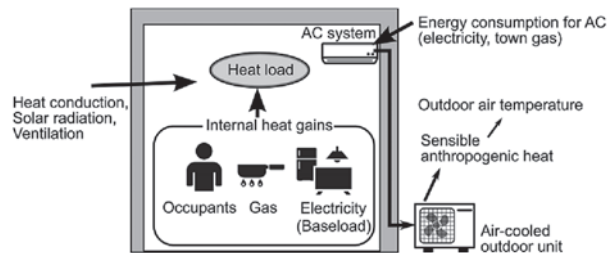


Fig. 3 Schematic illustrates the calculation of the building energy budget.

空調室外機からの排熱に伴う外気温への影響を計算する。このベースロードと空調電力需要量の和が建物での電力需要量となる。本研究では計算された電力需要量と実データの電力需要量を比較する。

建物用途はエネルギー需要量を計算するうえで重要な要素の一つである。WRF-CM-BEMでは計算格子内の建物用途は単一であるという仮定のもと計算され、土地利用が業務街区(C)、集合住宅(Rm)、戸建住宅(Rd)の各格子(Fig.2b)についてエネルギー需要量を計算する。WRF-CM-BEMの詳細については、既往研究<sup>5,7)</sup>で記述されている。

### 2.3 計算設定

計算領域は首都圏を含む東日本を覆う範囲とし、水平解像度25km → 5km → 1kmのネスティングを施した。入力データとしてNCEP GDAS/FNL、海面温度にGHRSSSTを用いた。また、計算期間は初期時刻を2018年6月25日9時とし、9月1日9時までの67日間とした。このうち7月と8月の62日間を解析対象期間とした。

### 2.4 モデルの改良

2.2で述べたように、WRF-CM-BEMではベース

ロード等から空調電力需要量を計算する。また、電力需要量検証時にもベースロードが用いられる。このように、ベースロードはWRF-CM-BEMの重要なパラメータである。既往研究ではベースロードを建物用途別に設定していた<sup>7-9)</sup>。本研究で用いる電力データの水平解像度はモデルの水平解像度と整合しているため、実データをもとにベースロードを格子別に設定することが可能となる。そこで、変電所別、時刻別、平日・土曜・日曜祝日別のベースロードを、電力需要量とその周辺の気象官署における気温、比湿時間値を用いてIhara et al.<sup>11)</sup>による回帰式(Fig.1)から算出した<sup>10)</sup>。その後、各格子内に含まれる変電所別の床面積をもとにベースロードを按分することで格子別のベースロードを算定した。建物用途別に集計したベースロードの時間変化をFig. 4に示す。業務街区のベースロードは終日を通

して集合住宅・戸建住宅よりも大きい。

### 3. 結果

#### 3.1 地上気温の再現性

モデルの地上気温の再現精度は電力需要量の再現精度に影響を与える。そこで、モデルの地上気温再現精度を5地点の観測値を用いて検証した。Figure 5に15時における地上気温分布とAMeDAS観測地点におけるモデルと観測値の地上気温日変化を示す。府中を除いた4地点ではモデルは気温の日変化をよく再現しており、二乗平均平方根誤差(RMSE)は1.69-2.20°Cであった。既往研究<sup>3, 4, 7, 8, 9)</sup>による気温の再現精度はRMSEで1.5-1.9°Cであることから、本研究のモデルの気温再現精度は妥当であったといえる。

#### 3.2 電力需要量の再現性

次に電力需要量の再現精度を検証した。2.2で述べたように、WRF-CM-BEMでは格子内の建物用途は単一であると近似している。そのため、まずは単一用途の建物構成に近い格子を業務街区、集合住宅、戸建住宅をそれぞれ抽出し、各格子の電力需要量について、モデルと実測値を比較した。Figure 6に実測値とモデルの電力需要量の平日の日変化を示す。いずれの建物用途においてもモデルは電力需要量の日変化を良好に再現している。平均絶対パーセント誤差(MAPE)は業務街区、集合住宅、戸建住宅でそれぞれ5.77%, 7.86%, 9.36%であった。また、土曜と日曜祝日を含む休日のMAPEは業務街区、集合住宅、戸建住宅でそれぞれ4.51%, 8.93%,

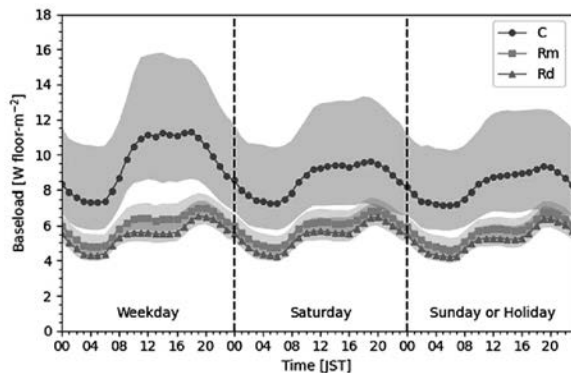


Fig. 4 Temporal variations of baseload for each land use category (Fig. 2b). Solid lines and shades indicate average and standard deviations, respectively.

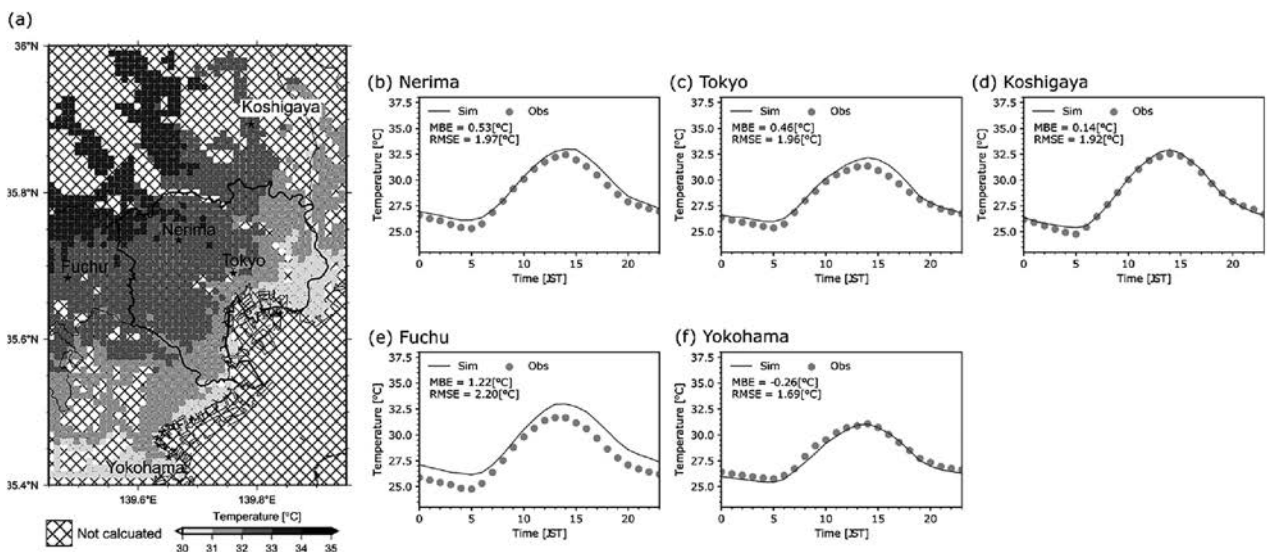


Fig. 5 (a) Distribution of Simulated near-surface air temperature at 1500 JST. (b)-(f) Diurnal variations of near-surface air temperature as observed at the AMeDAS stations (dot) and simulated by WRF-CM-BEM (solid line). MBE : Mean bias error, RMSE : Root mean square error.

10.30%であった。このように、平日と休日ともに WRF-CM-BEM は電力需要量を良好に再現している。

Figure 7 に平日 15 時の気温と電力需要量の関係をモデルと実測値について示す。以下では気温変化に対する電力需要量の変化（気温感応度）を回帰直線の傾き（ $\Delta EC/\Delta T$ ）で定義する。いずれの建物用途においてもモデルの（ $\Delta EC/\Delta T$ ）は実測値とおおむね一致する。この結果は WRF-CM-BEM が気温感応度を良好に再現可能であることを示唆するものである。

Figure 8 にモデルと実測値の平日 9 時から 18 時の平均電力需要量分布を示す。モデルの電力需要量分布は都心の千代田や新宿と比較して港の電力需要量が低い。このことは実測値とも一致する。また、その周辺の住宅街区についても、モデルの電力需要量は実測値とおおむね一致する。Figure 9 に MAPE の分布と建物用途別の箱ひげ図を示す。75% 以上の集合住宅・戸建住宅格子において MAPE が 16% 以下を示し、WRF-CM-BEM は典型的な住宅格子以外においても電力需要量を良好に再

現していることが分かった。一方で、業務街区の場合、上位 25% の格子では MAPE は 12% 以下と良好に電力需要量を再現していたが、下位 25% の格子では MAPE が 28% 以上を示し、業務街区の電力需要量の再現精度は集合住宅・戸建住宅と比較してはらつきが大きかった。WRF-CM-BEM の業務街区に

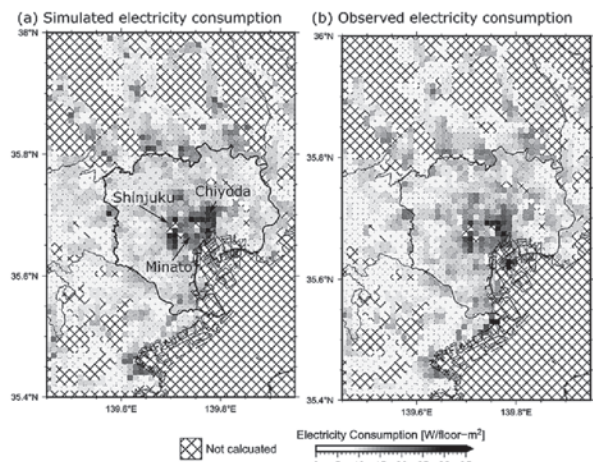


Fig. 8 Distribution of (a) simulated and (b) observed electricity consumption during 0900 and 1800 JST on weekdays.

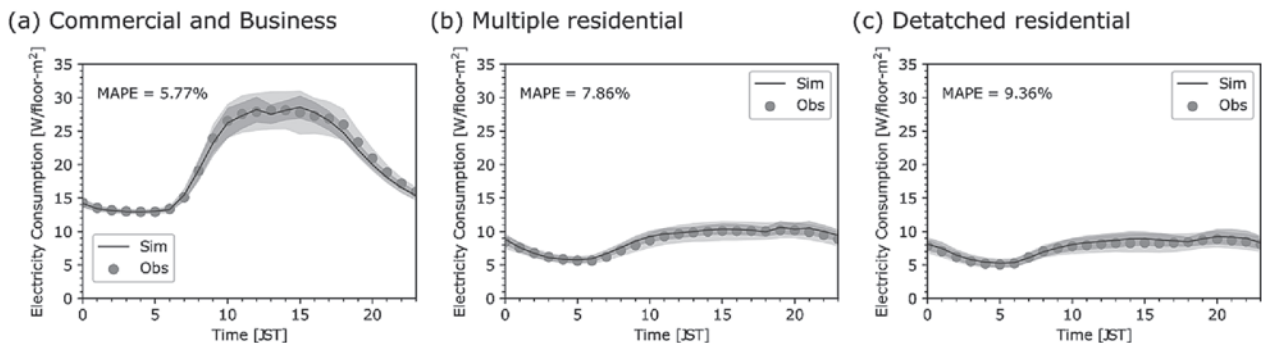


Fig. 6 Diurnal variations of simulated (line) and observed (dot) electricity consumptions on weekdays. MAPE : Mean absolute percentage error.

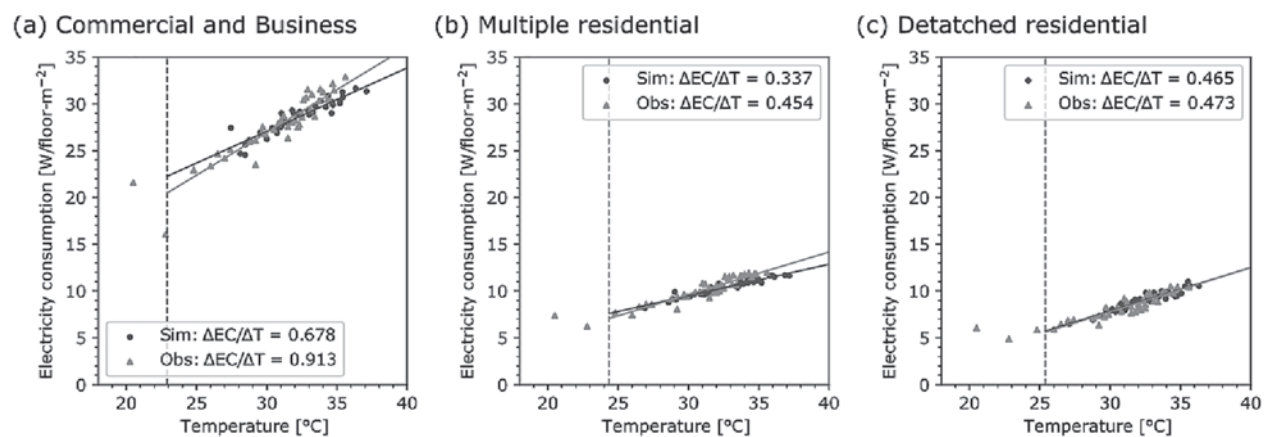


Fig. 7 Relationships between near-surface air temperature ( $T$ ) and electricity consumption at 1500 JST on weekdays. Dashed line, solid lines and ( $\Delta EC/\Delta T$ ) indicate threshold temperature (Fig. 1  $T_s$ ), regression lines ( $T > T_s$ ), and regression coefficient.

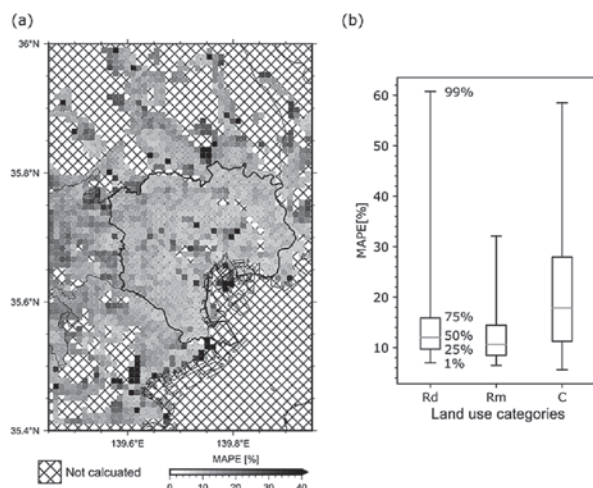


Fig. 9 (a) Distribution of MAPE between simulated and observed electricity consumption. (b) Box plot of MAPE for each land-use category (Fig. 2b).

は建物用途が事務所と商業施設が含まれている。事務所と商業施設では空調需要量がピークとなる時間などが異なる<sup>10)</sup>。こうした行動スケジュールの違いによる誤差が業務街区における精度のばらつきを大きくしているものと推察される。

### 3.3 電力需要量再現精度の既往研究との比較

上述のように、本研究の電力需要量の再現精度は、典型的な業務街区、集合住宅、戸建住宅において MAPE でそれぞれ 5.77%, 7.86%, 9.36% であった。その他の格子を含めても、業務街区と集合住宅・戸建住宅の MAPE はそれぞれ 28% 以下、16% 以下であった。最後に、これらの再現精度を既往研究と比較する。東京を対象とした既報<sup>6)</sup>では業務街区と住宅街区での MAPE はそれぞれ 9.4% と 40.7% である。また、大阪を対象とした既報<sup>8)</sup>では業務街区と住宅街区での MAPE はそれぞれ 16% と 42% である。本研究における典型的な格子での電力需要量の再現精度はこれらの既往研究と比較しても良好であった。また、ほとんどの住宅街区で既往研究と比較して良好な再現精度であった。

## 4. 結論

領域気候・都市気候・建物エネルギー連成数値モデル WRF-CM-BEM を 2018 年夏季の首都圏に適用し、夏季電力需要量の再現性を検証した。結果は以下のとおりである。

建物用途が単一に近い格子における WRF-CM-BEM による電力需要量の再現精度を検証した。MAPE を指標とした平日の再現精度は業務街区で 5.77%、集合住宅で 7.86%、戸建住宅で 9.36% であ

た。休日においても平日と同程度の再現精度を示した。これらの再現精度は既往研究と比較して良好であった。また、いずれの建物用途についても WRF-CM-BEM による気温に対する電力需要量の傾き(気温感応度)は実測値とおおむね一致した。

また、WRF-CM-BEM は電力需要量分布を良好に再現し、特に集合住宅・戸建住宅ではほとんどの格子で MAPE で 16% 以下の良好な再現精度を示した。

## 謝辞

本研究は環境研究総合推進費(JPMEERF20191009)の助成を受けて行われた。

## 参考文献

- 1) IEA, Empowering Cities for a Net Zero Future : Unlocking resilient, smart, sustainable urban energy systems, pp.111 (2021).
- 2) Ichinose, T., Shimodozono, K., Hanaki, K., Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, Atmospheric Environment, **33**, 3897-3909 (1999).
- 3) Salamanca, F., Georgescu, M., Mahalov, A., Moustauoi, M., Wang, M., Svoma, B. M., Assessing summertime urban air conditioning consumption in a semiarid environment, Environmental Research Letters, **8**, 1-9 (2013).
- 4) Xu, X., Fei, C., Shuanghe, S., Miao, S., Barlage, M., Guo, W., Mahalov, A., Using WRF - Urban to Assess Summertime Air Conditioning Electric Loads and Their Impacts on Urban Weather in Beijing, Journal of Geophysical Research : Atmospheres, **123** (5), 2475-2490 (2018).
- 5) Kikegawa, Y., Genchi, Y., Yoshikado, H., Kondo, H., Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands, Applied Energy, **76** (4), 449-466 (2003).
- 6) Lipson, M. J., Thatcher, M., Hart, M. A., Pitman, A., A building energy demand and urban land surface model, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, **144**, 1572-1590 (2018).
- 7) Kikegawa, Y., A. Tanaka, Y. Ohashi, T. Ihara, Y.

Shigeta : Observed and simulated sensitivities of summertime urban sur-face air temperatures to anthropogenic heat in downtown areas of two Japanese major cities Tokyo and Osaka, *Theoretical and Applied Climatology*, **117**, 175-193 (2014).

- 8) Takane, Y., Kikegawa, Y., Hara, M., Ihara, T., Ohashi, Y., Adachi, S. A., Kondo, H., Yamaguchi, K., Kaneyasu, N., A climatological validation of urban air temperature and electricity demand simulated by a regional climate model coupled with an urban canopy model and a building energy model in an Asian megacity, *International Journal of Climatology*, **37**, 1035-1052 (2017).
- 9) 亀卦川幸浩・山川洋平・徳竹衿也・大橋唯太・高根雄也・井原智彦・鍋島美奈子, 日射と電力需要の再現性に着目した都市気象・建物エネルギー連成数値モデルの検証, *土木学会論文集 G (環境)*, **73 (2)**, 57-69 (2017).
- 10) Nakajima, K., Takane, Y., Fukuba, S.,

Yamaguchi, K., Kikegawa, Y., Urban electricity-temperature relationships in the Tokyo Metropolitan Area, *Energy and Buildings* (under review).

- 11) Ihara, T., Genchi, Y., Sato, T., Yamaguchi, K., Endo, Y., City-block-scale sensitivity of electricity consumption to air temperature and air humidity in business districts of Tokyo, Japan, *Energy*, **33 (11)**, 1634-1645 (2008).

#### 著者略歴



中島 虹 (ナカジマ コウ) 2018年9月  
首都大学東京大学院都市環境科学研究  
科地理環境科学域博士後期課程修了,  
学位取得 (博士 (理学)). 2017年7月  
-2019年9月公益財団法人東京都環境  
公社東京都環境科学研究所研究員. 2018年10月-  
2019年9月首都大学東京都市環境学部地理環境学科  
研究員. 2019年10月国立研究開発法人産業技術総  
合研究所産総研特別研究員. 現在に至る.