

## 【コラム】都市化と短時間降水に関する最近の研究から

近年、都市での短時間強雨について社会的関心が高まっている。しかしながら、ヒートアイランド現象と短時間強雨との関連性については、まだ解明されていない点も多い。ヒートアイランド現象は、出現頻度も高く、気温データから特徴が捉えやすいのに対し、短時間強雨はそれに比べて出現頻度が低い上に、局地性が大きく、変動実態を捉えにくいことがその一因である。

このような難しさがあるものの、ここでは、気象庁気象研究所における関東地方に関しての最近の研究成果の中から観測データによるものと数値シミュレーションによるものをそれぞれ1つずつ紹介したい。

まず、観測データに基づく研究(Fujibe *et al.*, 2009)を紹介する。降水は低気圧や前線等の様々な影響によって生じるため、観測された降水から都市化の影響による部分を抽出することは困難であるが、この研究では都市化の影響が他の影響と比べて比較的大きく現れると考えられるタイプの降水に焦点を当てて解析を行った。具体的には、東京の118年分(1890年から2007年)の地上気象観測データから、降水開始前6時間に先行するまとまった降水(1mm以上の降水)がない場合の降水(以下「非継続的降水」という)について長期変化傾向を調査した。その結果、春から夏の夕方を中心に降水量の増加傾向があることが分かった

(図1)。また、関東地方の30年分(1978年から2007年)のアメダス観測データから、同様の非継続的降水について長期変化傾向を調査した結果、郊外の観測地点に比べて都市部の東京、練馬、世田谷の観測地点で、春から夏の夕方を中心に降水量の増加傾向があることが分かった。これらは、都市化以外の要因(例えば、地球温暖化等)による影響も考えられるものの、都市化の影響による降水変化の可能性を示唆するものである。

次に、数値シミュレーションによる研究(Seino *et al.*, 2016)を紹介する。この研究では、東京都近辺の8年間(2006年から2013年)の8月について、現状の都市環境を再現した実験(現状都市実験)とそれより都市化の程度が小さいと仮定した実験(都市化軽減実験)を統計解析して比較することで、都市化の影響による降水変化を調査した。その結果、現状都市実験は都市化軽減実験と比べて東京23区付近を中心に降水量が増加することが分かった。これは、都市化に伴う東京周辺の夏季降水量増加を示したKusaka *et al.* (2014)の数値シミュレーション結果を支持するものである。また、Fujibe *et al.* (2009)と同様の非継続的降水(8月の午後の68事例)についての比較においても、現状都市実験では東京23区付近の降水量が増加した(図2)。この結果は、観測データに基づくFujibe *et al.* (2009)の研究とも整合的である。さらに、非継続的降水が始まる1時間前には、現状都市実験では、都市域の高温偏差(ヒートアイランド現象)や水平収束の強化(高温偏差に対応する低圧部に吹き込む風の成分が強まること)及び鉛直流の増加があることが示された。これは、ヒートアイランドの形成に伴う局地循環の強化が、都市化による降水強化のメカニズムとな

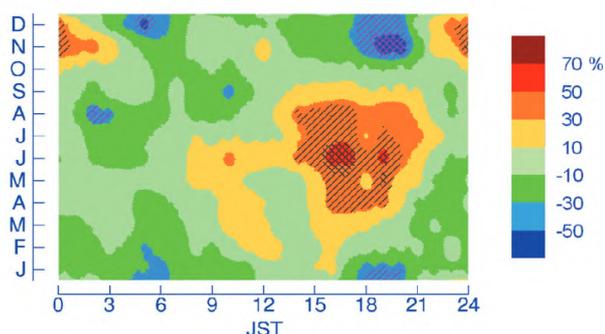


図1 東京の非継続的降水(前6時間降水量が1mm未満であるときの降水)の長期変化傾向(1890~2007年)

単位は、%/100年。黒線のハッチ域と二重ハッチ域はそれぞれ信頼度水準95%以上、99%以上を示す。(Fujibe *et al.* (2009)より)

っている可能性を示唆するものである。

ここで紹介した研究は、主として都市化の影響としてその熱的效果による降水変化の可能性を示唆するものであったが、その他にも、都市における高層ビル群の障壁効果によって、迂回した海風の収束が降水を強化する可能性を示唆する研究（高橋ほか，2011）等もある。また、地球温暖化による影響との寄与度の違い等について不明な点も多いことから、今後さらに研究を進める必要がある。

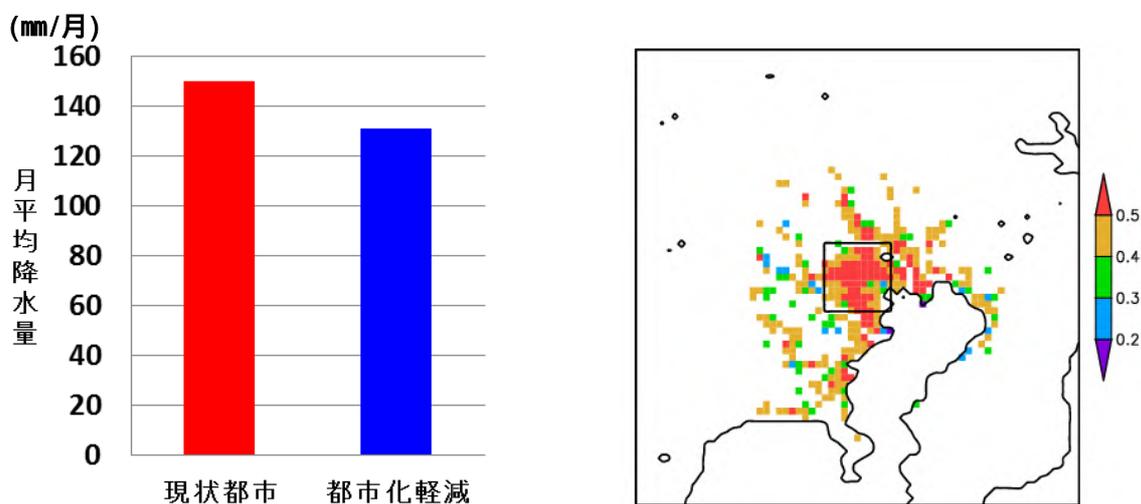


図2 東京都近辺における非継続的降水(8月の午後の68事例)の現状都市実験と都市化軽減実験の降水量の比較(左図)と都市域及びその領域における建物占有率(右図)

左図は、現状都市実験と都市化軽減実験のそれぞれにおいて、8月の午後の68事例の降水量を右図の四角囲み領域で平均し、月降水量に換算した値を示す。また、右図で色塗りをしている部分は、モデル内で都市域と設定した部分(道路や建物等による人工被覆率が2kmのモデル格子内で80%以上)を表し、建物占有率(色分け)は、そのモデル格子内での建物の占める面積割合を示す。建物占有率0.5はそのモデル格子内の面積の半分を建物が占めている状況を表す。(Seino *et al.*(2016)を元に作成)

## — 参考文献 —

環境省, 2004: ヒートアイランド現象による環境影響に関する調査検討業務報告書

<http://www.env.go.jp/air/report/h16-04/index.html>

環境省, 2013: ヒートアイランド対策ガイドライン平成 24 年度版

[http://www.env.go.jp/air/life/heat\\_island/guideline/h24.html](http://www.env.go.jp/air/life/heat_island/guideline/h24.html)

気象庁, 2012: ヒートアイランド監視報告 (平成 23 年)

<http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr/index.html>

気象庁, 2017: 気候変動監視レポート 2016

<http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/index.html>

高橋日出男, 中村康子, 鈴木博人, 2011: 東京都区部における強雨頻度分布と建築物高度の空間構造との関係. 地学雑誌, 120, 359-381.

日本ヒートアイランド学会編集, 2015: ヒートアイランドの事典 仕組みを知り, 対策を図る . 朝倉書店, 352pp.

藤部文昭, 2012a: 都市の気候変動と異常気象 猛暑と大雨をめぐって. 朝倉書店, 176pp.

藤部文昭, 2012b: 観測データから見た日本の都市気候. 気象研究ノート, **224**, 1-23.

Fujibe, F., H. Togawa and M. Sakata, 2009: Long-term change and spatial anomaly of warm season afternoon precipitation in Tokyo. SOLA, **5**, 17-20.

Kusaka, H., K. Nawata, A. Suzuki-Parker, Y. Takane, N. Furuhashi, 2014: Mechanism of Precipitation Increase with Urbanization in Tokyo as Revealed by Ensemble Climate Simulations. J. Appl. Meteor. Climatol., **53**, 824-839.

Seino, N., T. Aoyagi and H. Tsuguti, 2016: Numerical simulation of urban impact on precipitation in Tokyo: How does urban temperature rise affect precipitation? Urban Climate, doi:10.1016/j.uclim.2016.11.007, in press.

## 付録 1: 長期変化傾向の統計的有意性の評価について

気温や降水量等の観測値は、様々な時空間スケールの大気や海洋の変動による影響を受けているため、自然のゆらぎを背景に地球温暖化や都市化に伴う変化傾向をとらえるためには、観測データを適切な統計量に変換し、時系列で並べた統計量にランダムな変動要因では説明できない系統的な変化傾向が含まれている可能性がどの程度か検定を行う必要がある。そして、「統計的検定」の結果、経年変化がランダムな変動要因だけでは説明できないと判断することが妥当な場合には、「統計的に有意な変化傾向がある」等と表現される。

本報告では、統計量にみられる長期変化傾向の有無について、統計的有意性を 90%の信頼度水準で検定した結果を判断基準としている。

この統計的検定には次のような手法を用いている。

### (イ) 統計量の年々変動成分が正規分布に従うことが仮定できる場合

平均気温や平均相対湿度等は、トレンド成分を除去した年々の統計量の出現頻度は正規分布に従うと仮定できる。概ね正規分布とみなすことが出来る統計量に対しては、ピアソンの積率相関係数を用いたパラメトリック検定 (t 検定) を行う。

### (ロ) 統計量の年々変動成分が正規分布に従うことが仮定できない場合

猛暑日や熱帯夜の日数、降水量等は、トレンド成分を除去した年々の統計量の出現頻度は正規分布に従うことが仮定できない場合がある。正規分布に従うと仮定できない統計量に対しては、ケンドールの順位相関係数を用いたノンパラメトリック検定 (ケンドール検定) を行う。

統計的検定では、原理的に「統計的に有意」と判定されても、結果が誤りである可能性が常に存在する。「信頼度水準 90%以上で統計的に有意」の場合には、観測値における経年変化傾向がランダムな変動要因により偶然に出現しているにも関わらず、誤って有意と判定してしまう確率を最大で 10%まで許していることを意味している。逆に、系統的な変化傾向が存在していても、それを正しく検出できない場合もある。一般的に、ノンパラメトリック検定はパラメトリック検定に比べて検出力が低く、有意な変化傾向として検出されにくい。また、統計年数が短い、年々の変動幅が大きい、発生頻度が稀、等の場合には、今後新しいデータが追加されることにより検定結果が変化する可能性が大きい。本報告の分析結果は、以上の「統計的検定」の性質に留意の上で活用されたい。

## 付録 2: 観測場所の移転に伴う気温データの補正方法について

ある観測地点において観測場所の移転があった場合、その地点の長期変化傾向を把握するためには、移転の影響を補正した長期間にわたる均質なデータが必要となる。しかし、実際の観測値には、様々な時空間スケールの自然変動や人為的影響（温暖化や都市化）による変動が含まれているため、その補正には注意を要する。

本報告書では移転の影響によって時系列データに階段状の変動が生じたと仮定して、次のような方法を用いて補正值（階段状の変動に伴う段差）を求めている。対象とするのは、月平均気温、日最高気温の月平均値、日最低気温の月平均値である。

### （イ）移転の前に新旧の観測場所で同時に観測が行われた場合（東京が該当）

それらが同時に観測された値を利用する。

「東京」の観測場所は、2014年12月2日に大手町から北の丸公園に移転したが、各観測場所における2年間（2012年4月～2014年3月）の月別統計値の2年間平均値を求めた上で、両者の値の差を月別補正值とした。なお、詳細は気象庁観測部（2016）を参照されたい。

### （ロ）移転にあたって新旧の観測場所で同時に観測が行われなかった場合（東京以外の地点が該当）

移転が行われた年を含めた前後8年間の観測値を利用する。

まず、移転の影響が無かった全国の気象官署の月平均値から、全国的及び地域的に生じている自然変動や人為的影響（温暖化や都市化）による変動パターンを見積もる。そして、移転のあった観測地点の月平均値は、先に見積もった全国的及び地域的に生じている変動と移転の影響による変動との和であると仮定し、重回帰分析を用いて月別補正值を求めた。詳細は大野ほか（2011）を参照されたい。

これらの手法では、移転によって階段状の変動が生じ、かつ、その移転の前後での観測環境の違いは統計期間中変わらず一定であったと仮定としているため、均質なデータを作成する際には、上記で求めた月別補正值を移転前の観測値すべてに一律に与えている。そして、年や季節の平均値は、この補正された月平均値を統計処理して求めている。

しかしながら、実際には移転前後の観測環境の違いは過去にわたって変わらず一定ではなく、補正值を過去にわたって一律に適用できるかどうかは分からない。そのため、補正方法は今後も大きな検討課題である。

### - 参考文献 -

- 大野浩史, 吉松和義, 小林健二, 若山郁生, 諸岡浩子, 及川義教, 平原翔二, 池田友紀子, 齋藤仁美, 2011: 気温の時系列データから気象官署の移転にともなう影響を補正する手法について. 測候時報, **78**, 1-2, 31-41.
- 気象庁観測部, 2016: 地上気象観測地点「東京」の露場移転について（その2 平年値の更新について）. 測候時報, **83**, 7-32.

### 付録 3: 都市気候モデルについて

#### 都市気候モデルの概要

都市気候モデルの概要を図 A1 に示す。都市気候モデルとは、数時間から 1 日先の大雨や暴風等の災害をもたらす現象を予測することを主要な目的として、日々の天気予報や防災気象情報の作成に利用されていたメソモデル（気象庁, 2003,2008）に、図 A1 で示すような、大気の状態とともに地形、都市域と草地や森林等の土地の利用形態、人工排熱等を入力し、地表面や建築物との熱のやり取りをモデル化したもので、都市における大気の状態をコンピュータ上で精度よく再現することを目的として開発されたものである。水平の解像度は 2km である。都市気候モデルの詳細設定については、萱場,石原（2014）や Aoyagi and Seino（2011）を参照されたい。

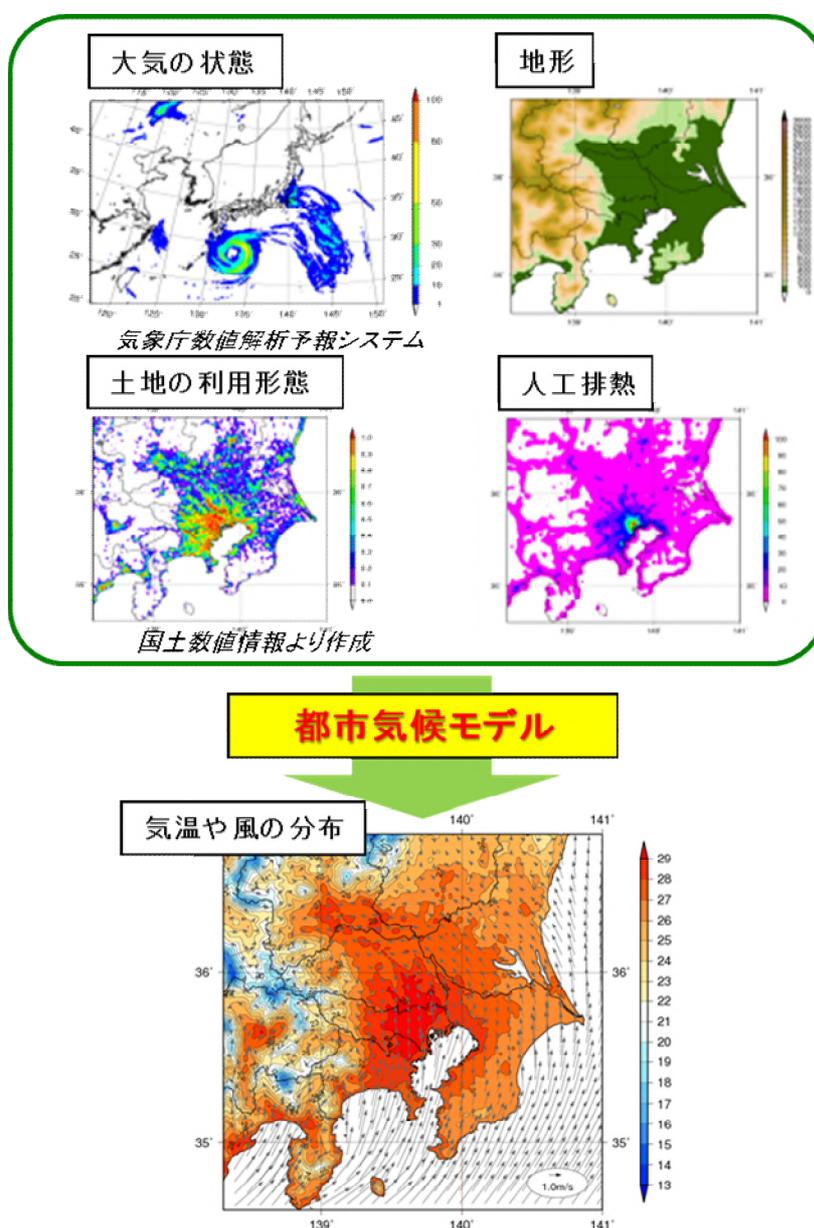
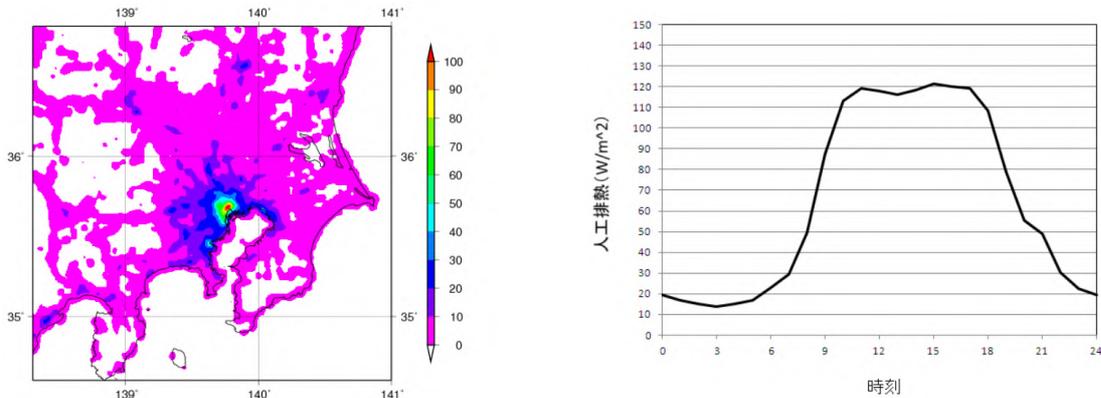


図 A1 都市気候モデルの概要

## 人工排熱量データ

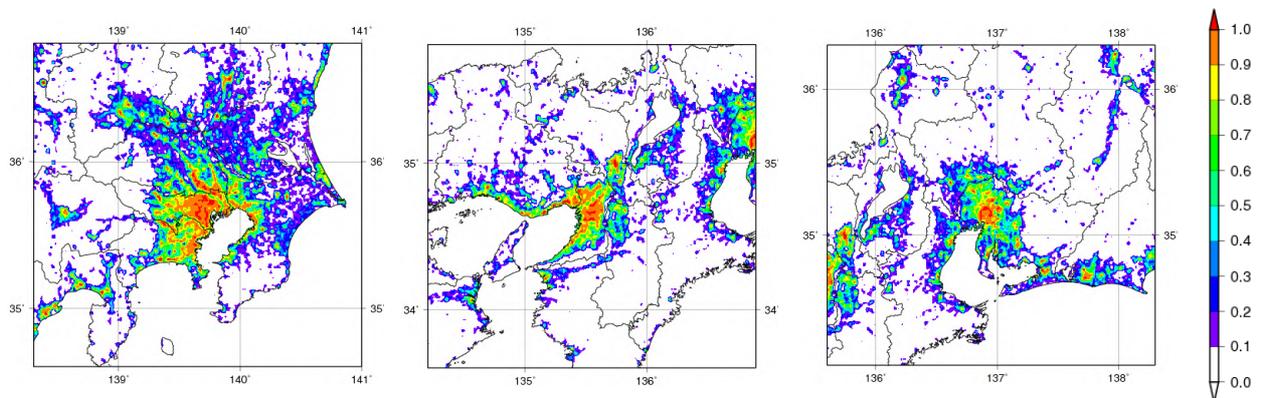
モデルに与える人工排熱量データについては、萱場ほか（2010）で作成された推定式により、総務省統計局の人口データや従業者数データ、国土数値情報の土地利用3次メッシュデータをもとに作成したデータを利用している。図A2は、上記で作成された関東の8月の15時の分布図と東京（大手町）の観測地点における8月の時系列図を示している。



図A2 シミュレーションで用いる8月の15時の人工排熱量分布（左図、単位： $W/m^2$ ）と東京（大手町付近）の8月の人工排熱量の24時間時系列図（右図、単位： $W/m^2$ ）

## 土地利用データと都市域の設定

都市気候モデルで用いる土地利用形態には、国土交通省国土政策局が公開している国土数値情報の土地利用3次メッシュデータ（平成18年度版）を使用している。本データの土地利用種別は、田、その他の農用地、森林、荒地、建物用地（住宅地・市街地等で建物が密集しているところ）、幹線交通用地（道路・鉄道・操車場等で、面的に捉えられるもの）、その他の用地（運動競技場、空港、競馬場・野球場・学校港湾地区・人工造成地の空地等）、河川地及び湖沼、海浜、海水域、ゴルフ場に分類されている。シミュレーションでは、このうちの建物用地、幹線交通用地、その他の用地の割合が50%（下図では0.5）以上を都市域と設定している（図A3）。



図A3 関東地方（左図）、近畿地方（中央図）、東海地方（右図）における都市気候モデルでの各格子の都市の割合

## 都市気候の評価方法

都市化による気候への影響を定量的に評価するために、都市の地表面状態や人工排熱を考慮した場合のシミュレーションを「都市あり実験」、また、都市の影響を除去した場合（都市域の地表面状態を草地に置き換え、かつ、人工排熱をゼロにすることで、仮想的に人間が都市を建設する以前の状態に戻す）のシミュレーションを「都市なし実験」として、2つの実験を行い、都市あり実験結果から都市なし実験結果を引いたものを都市化の影響とみなす（図 A4）。

なお、このモデルの都市あり実験における再現精度については概ね良好である。詳細については「ヒートアイランド監視報告（平成 23 年）」、「同（平成 24 年）」（気象庁、2012,2013）を参照されたい。

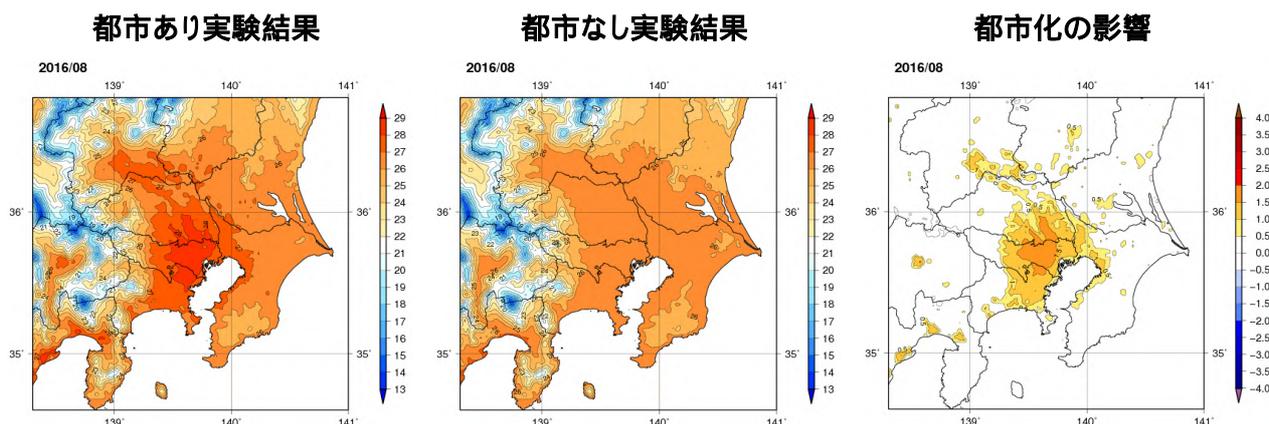


図 A4 関東地方における 2016 年 8 月の平均気温の都市あり実験結果（左図、単位： $^{\circ}\text{C}$ ）、都市なし実験結果（中央図、単位： $^{\circ}\text{C}$ ）、都市化の影響による平均気温の変化：「都市あり実験」と「都市なし実験」の差（右図、単位： $^{\circ}\text{C}$ ）

### - 参考文献 -

気象庁, 2003: 数値予報課報告・別冊第 49 号 気象庁非静力学モデル

気象庁, 2008: 数値予報課報告・別冊第 54 号 気象庁非静力学モデル - 現業利用の開始とその後の発展 -

気象庁, 2012: ヒートアイランド監視報告（平成 23 年）

気象庁, 2013: ヒートアイランド監視報告（平成 24 年）

<http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr/index.html>

萱場互起, 青柳暁典, 高橋俊二, 2010: 重回帰分析による人工排熱量の推定. 測候時報, 77.4-6, 137-153.

萱場互起, 石原幸司, 2014: 都市気候モデルを用いたヒートアイランドの監視. 日本ヒートアイランド学会誌, 9, 25-29.

Aoyagi, T., and N. Seino, 2011: A square prism urban canopy scheme for the NHM and its evaluation on summer conditions in the Tokyo metropolitan area, Japan. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50, 1476-1496.