特集

風による都市の暑熱環境の緩和

気象・都市スケールの温熱環境

Thermal Environment of City-Scale in the Meteorology

日下博幸^{*1}

Hiroyuki KUSAKA

1. まえがき

「気象・都市スケールの温熱環境」というタイトルで本誌解説を依頼されたとき、気象学分野における都市スケールの温熱環境の話を書くことが望まれている、と理解しました。そこで、本稿では、気象学分野における都市スケールの温熱環境について、歴史的な流れも意識しながら、最近の取り組みについて紹介したいと思います。ただ、私が数値シミュレーションの研究を多く行っていることや、最近の都市スケールの温熱環境の研究の多くが数値シミュレーションに関するものであることから、数値シミュレーションの話題が中心になることをご了承ください。また、都市スケールでの温熱環境とエネルギー需要の関係や、温熱環境と都市計画の関係、温熱環境と健康の関係なども重要なテーマですが、これらはそれぞれの専門家の方に解説してもらったほうが良いと判断したので、本稿では割愛することにしました。

気象学・気候学の一分野である都市気象学・都市気候学分野では、伝統的には、メソスケール（都市～都市圏スケール）の温熱環境を主として扱ってきました。なぜならば、1833年にルーク・ハワードによって（ロンドンの気候という著書で）ヒートアイランド現象が紹介されてから、都市気象学・都市気候学の主な研究対象は、ヒートアイランド現象であり、その目的は「なぜ都市は郊外よりも気温が高くなるのだろうか？」といった都市特

有の大気現象の理解を深めることだったからです。

最近では、気候変動への関心が高いことから、「都市の気候は将来どうなるのだろうか？」という視点で都市スケールの気候の研究が活発になされています。気候変動の研究が取り扱う内容は、温熱環境や降水はもちろんのこと、人間の健康やエネルギー需要への影響まで拡大しており、都市気候学と他分野の垣根はますますなくなりつつあります。将来予測の研究分野では、IPCCの次期報告書（第6次評価報告書、AR6）への貢献が期待されています。これについては、第3節で詳しく紹介します。

2. 気象学分野における都市の気温とは？

第1節で述べたように、気象学・気候学の分野では、伝統的に、ヒートアイランド現象をメソスケールの大気現象とみなして研究してきました。これが意味するところは、気候学・気象学で定義されるヒートアイランド現象は、都市（あるいは都市圏）が存在することによって都市（あるいは都市圏やその風下地域）の気温が全体的に高くなる現象であるということです。都市内のある場所の気温だけが局所的に高くなるマイクロスケールの現象を指してはいません。このため、ヒートアイランドの強さ（大きさ）を評価する際に用いる都市の気温の定義は、局所的な影響を受けずに、都市全体の影響だけを受けている気温ということになります。この場合、都市の気温は、都市内のオープンスペースで地表面状態が草地

*1 筑波大学計算科学研究センター 教授 (kusaka@ccs.tsukuba.ac.jp)
Professor, Center for Computational Sciences, University of Tsukuba

である場所の気温、もしくは、ある地域内の多数の観測地点の気温の平均値として定義されます。気象庁のアメダス気温は前者、気象モデル・気候モデルで計算される気温は後者を意味します。

3. 都市気象モデル、都市気候モデル

風工学分野にとって、CFD モデルを用いた数値シミュレーションが非常に重要な研究手段であるのと同じく、気象学・気候学分野でも、気象モデル・気候モデルを用いた数値シミュレーションは非常に重要な研究手段となっています。天気予報、気候変動予測などは、全て、数値シミュレーションモデル（以下、数値モデル）なくして成り立ちません。都市気象学・都市気候学分野も例外ではありません。

気象学・気候学分野で利用される数値モデルは、再現したい現象のスケールによって大きく 3 種類に分けられます。一つ目は、地球規模の気象・気候をシミュレートするモデルで、大気大循環モデルや全球気候モデルなどが代表的です。大気大循環モデルの英語名は、General Circulation Model、全球気候モデルは Global Climate Model で、どちらも GCM と呼ばれています。大気大循環モデルは日々の天気予報などに使われることを目的に開発され、全球気候モデルは、気候変動予測などを目的に開発されました。GCM の水平分解能は、従来、100km 程度であったため、都市はまったく表現されていませんでした。しかしながら、水平分解能が向上し、さらには、都市の熱収支をシンプルに表現できる都市キャノピーモデル (Urban Canopy Model, UCM ; 第 4 節で紹介します) が 2000 年代の初頭に開発されるようになると、GCM にも UCM を搭載し、都市の気温をより精度良く計算しようという試みがなされるようになりました¹⁾。そして、UCM を搭載した GCM を用いて地球温暖化とヒートアイランドの両方を考慮した気候変動研究や、ヒートアイランド対策効果の評価などが行われるようになりました²⁾。

二つ目の数値モデルは、領域気象モデル・領域気候モデルです。昔は、メソスケールモデルと呼ばれていましたが、現在では、計算対象がメソスケールの現象に限らないことから、その名前では呼ばれることは少なくなりました。領域気象モデルが対象とする典型的な範囲は、都市スケールから大陸スケールくらいで、水平分解能は数 100m～数 10km 程度です。領域気象モデルは、早くから都市気象の研究に使われていました。1970 年代～1990 年代までは、都市を粗度が大きく、アルベドが小さく、熱容量が大きく、乾いている土壌と見なし熱収支式を解

くことで、メソスケールモデルの中で都市を表現していました³⁾。1990 年代から、汎用モデルに位置づけられる MM5 (The fifth-generation Mesoscale Model, ペンシルベニア州立大学とアメリカ国立大気研究センターで共同開発された領域気象モデル) や RAMS (Regional Atmospheric Modeling System, コロラド州立大学で開発された領域気象モデル) が世界中で使われるようになり、2000 年代になるとヒートアイランドのシミュレーション研究が増えていきました⁴⁾。2005 年に当時の最新鋭モデルであった WRF (Advanced Research - Weather Research and Forecasting Model, アメリカ国立大気研究センターで開発された領域気象モデル) に UCM が導入され、そのバージョンがリリースされると、世界中で WRF を用いた都市気象シミュレーション研究が行われるようになりました⁵⁾。

2010 年代になると、WRF に代表される領域気象モデルは、都市の将来気候予測実験にも使われるようになっていきました^{6,7,8)}。そして、積分期間が長くなるにつれ、領域気象モデルは領域気候モデル (Regional Climate Model, RCM) と呼ばれるようになりました。また、GCM を境界値として地域の気候を計算する手法は、力学的ダウンスケール実験（もしくは、力学的ダウンスケーリング）と呼ばれるようになりました。力学的ダウンスケーリング関係の研究成果については、第 5 節でもう少し詳しく紹介します。

三つ目のモデルは、都市街区内の現象を対象にしたマイクロスケールの数値モデルです。このモデルは、風工学分野における CFD モデルとよく似ています。ただし、モデルの予報変数として気温ではなく温位を用いるなど、異なる点もあります。また、基礎方程式系には、水蒸気、雲水、雨水などの保存式を持ち、そのため、予報変数として、水蒸気、雲水、雨水などの混合比を持つ点も異なります。さらには、太陽放射モデル・大気放射モデル・地表面モデル・雲物理モデルといった大気の物理モデル（サブモデル）を含んでいる点、現象の時間変化、特に日変化を重視する点も異なります。都市気象学・都市気候学のためのマイクロスケールの数値モデルには、一般的な気象学の数値モデルとは異なり、建物や街路樹の効果、人工排熱の効果などが考慮されています^{9,10)}。そして、これらについては、建築工学分野の知見を大きく取り入れています。

4. 都市キャノピーモデルについて

ここでは、世界で最も広く使われている領域気象モデル WRF を例にとり、WRF に搭載されている 3 つの UCM

を紹介します⁵⁾ (図1)。WRF ユーザの93%がオプション1を選んでいるという調査結果を考慮して¹¹⁾、はじめに、単層キャノピーモデルについて紹介します。WRFに搭載されているUCMのオプション1は、著者らによって開発された単層キャノピーモデル (Single-Layer Urban Canopy Model, SLUCM) で、都市表面と大気との熱、水、運動量の輸送量の計算を目的に開発されたものです。これらの値は、屋根面・壁面・道路面で計算されるフラックスの面積加重平均値として計算されます。キャノピー層内の気温は診断的に計算され、風速は解析的に計算されます。熱収支やフラックスで見た場合の単層キャノピーモデルのパフォーマンスは、多層キャノピーモデルに近いことが確認されています¹²⁾。また、気候計算でも高精度な結果が得られることも確認されています⁶⁾。

図1 WRFに導入されているUCMの概念図

左側はSLUCM内での風速・フラックス・日射の概念で、右側はBEP内でのそれらの概念⁵⁾。

オプション2は、多層キャノピーモデル (Building Effect Parameterization, BEP) です。キャノピー層内の風と温度の鉛直分布を予測計算することができます¹³⁾。オプション3は、多層キャノピーモデルにビルエネルギーモデル (Building Energy Model, BEM) を結合したものです¹⁴⁾。一般的なUCMでの人工排熱の取り扱いと異なり、BEMでは外気温や建物内の気温・設備・人間活動に合わせて人工排熱が計算されます。なお、WRFの開発機関であるNCARは、GCMも開発しており、そこでもWRFのUCMと類似のUCMが搭載されています。

5. 領域気候モデルを用いた都市スケールの温熱環境研究
都市スケールの温熱環境のシミュレーション研究は、主として、領域気候モデルを用いて行われます。1990年代～2000年代は、ある典型的なヒートアイランド出現日を対象に数日程度のシミュレーションが行われていましたが、2010年代以降、地球温暖化研究の活発化に伴い、数ヶ月～数年の都市気候シミュレーションも活発に行われています。

短い時間スケールの現象を対象とした最近の研究として、極端高温現象の研究があげられます。極端高温現象は、都市に限らず発生しますが、人々の多くは都市に住んでいるため、都市の極端高温現象が注目されています。日本の場合、極端高温は、フェーン現象によって出現するため、フェーンを対象とした日本最高気温記録の要因解明などが行われています^{15,16)}。また、極端高温現象に及ぼすフェーンとヒートアイランドの比較評価なども行われています¹⁷⁾。NishiらによるWRFによるシミュレーション結果は、新潟の夜間の極端高温現象 (深夜でも30℃) に対して、フェーンとヒートアイランドが同程度、昇温に寄与していたことを示しており、これはヒートアイランドが極端高温の出現に無視できない貢献をしていることを意味しています。

海外では、都市の極端高温を熱波 (heat wave) の視点で研究することが多いように感じます。熱波という偏西風の蛇行が生み出すブロッキング現象によるものがありますが、一般的には、広い範囲で数日間以上の連続した極端高温であり、原因は含まれてはいません。過去の有名な熱波事例には、2003年、2019年の欧州の熱波と2006年のアメリカの熱波があります。2003年の熱波によって欧州で7万人以上の熱中症死亡者が出て以来、熱波は広く関心が持たれるようになりました。都市の温熱環境との関係としては、「熱波時の都市の温熱環境の実態調査」や「熱波とヒートアイランドの相乗効果」、「将来の熱波時のヒートアイランド」に関する研究などがあります。^{18,19,20,21,22)} 研究の多くは、熱波時にはヒートアイランドは強まり、都市もまた熱波を強めるという結果を得ています。また、欧州の都市は (普段涼しいため) 熱波に脆弱で、対策が必要であるという提言や、緩和策導入効果の評価もなされています。

時間スケールの長い研究としては、やはり、気候変動研究が第一にあげられます。将来の都市の温熱環境を予測する研究や、過去から現在、そして将来までの都市の発展が同地域の気候に及ぼす影響などが、数値シミュレーションによって評価されています。また、複数の将来都市シナリオを用いた将来都市気候予測の研究も行われています^{23,24,25,26)}。東京やブリュッセルのようにすでに発達した都市の場合、今後の気温上昇はヒートアイランドではなく温暖化によって引き起こされると予測されています^{27,28)} (図2)。そのため、コンパクトシティのように都市構造を変化させたとしても、その効果はかなり小さいことがシミュレーションによって示唆されています²⁴⁾ (図3)。一方で、東南アジアの大都市のように、今後も

発展し続けると予想されている都市の場合、東京とは大きく異なる結果が得られています。例えば、ベトナム最大の都市であるホーチミンは、現在（2009 年）から 2050 年までの都市化による気温上昇量は、将来も都市が発展し続けるため（図 4）、今後の温暖化による気温上昇量と比べて無視できないレベルにあることがシミュレーションによって示唆されています²⁹⁾（図 5）。私のレビューが不十分である可能性はありますが、東南アジアの途上国の都市気候将来予測研究の多くが日本発のようであり、途上国の都市気候研究に対する日本の研究グループの貢献はかなり高いと言えそうです^{30,31)}。都市の温熱環境の将来予測のなかには、少数ではありますが、将来の都市化と大陸スケールの気候変動の相互作用に着目する研究があります³²⁾。都市の発展が果たしてどの程度広域の気候変動に影響を与えるのか？さらなる研究が望まれます。

図 2 練馬と熊谷における地上気温の出現頻度

上図は観測値（黒線）とモデルによる再現実験（赤線）の値、下図は再現実験の結果（赤線）、将来の都市化時の値（緑線）、将来の温暖化時の値（青線）

図 3 WRF によって計算された 2000 年代から 2050 年代までの 8 月の地上気温の昇温量²⁴⁾

(a) 将来の都市が現在と同じ場合、(b) コンパクトシティになった場合、(c) 分散都市になった場合

図 4 ホーチミン市における日平均人工排熱分布
左図が 2009 年 4 月現在、右図は 2050 年 4 月の推定値
（Doan and Kusaka 2018²⁹⁾ の Fig. 3 の一部抜粋）

図 5 ホーチミン市における RCP4.5 シナリオ下での 2010 年から 2050 年までの気温上昇量

左列、中央、右列の 2 つの棒グラフは、それぞれ、今後の開発地域、現在・将来の都心、現在・将来の郊外における都市化と温暖化の効果

（Doan and Kusaka 2018²⁹⁾ の Fig. 17 の一部抜粋）

過去 30 年間に気象モデルのコミュニティーモデル化（世界共通ツール化）の時代だとすれば、今後は都市データベースの共有化の時代になると著者は予想しています。少し前から、都市気候研究者たちは、世界各地の都市のタイプを 17 種類に類型化する取り組みを行っています³³⁾。この類型化は Local Climate Zone (LCZ) と呼ばれていて、世界中で研究が盛んに行われています。その後、世界各都市を対象として、都市気候モデルなどに必要な都市表面パラメータやエネルギー消費のデータベースを LCZ 毎に作成する国際プロジェクト WUDAPT が始まりました³⁴⁾。現在では、様々な研究機関が世界の人工排熱

マップの作成に取り組んでいます。日本では東京工業大学の神田学研究室が取り組んでいます。WUDAPTをはじめとするこれらのデータベースは、都市気候シミュレーション研究への貢献はもちろんのこと、Global Urban Climatology 研究全体を支える重要な世界共有データになると期待されています。

6. 都市の温熱環境が雲、降水に及ぼす影響

都市の温熱環境は、風や、雲、雨に影響を与えると考えられています。「都市はなぜ雲を作り、雨を降らすのだろうか？」というのは、都市気象学・都市気候学分野における伝統的かつ重要なテーマの一つです。1970年代には、この分野としては大変大きなプロジェクトと言える「METROMEX」プロジェクトが米国セントルイスで行われ、当時としては最新技術であった気象レーダーや3次元メソスケールモデルなどを用いて、都市と降水の関係を調査しました³⁵⁾。現在でも、米国や中国を中心にレーダーや数値モデルを用いた事例研究が精力的に続けられています。^{36,37,38,39)}東京に関しては、暖候期に降水量が増加傾向にあることを観測事実から統計的に示す研究や⁴⁰⁾、事例研究の不確実性を軽減するために、多数の数値実験結果を用いて都市が降水に与える影響を統計的に検定するという研究がなされています^{41,42)}。図6は、都市化によって都市域とその風下では短時間強雨が統計的に有意に増加したことを示した243アンサンブル実験の結果です⁴²⁾。都市の発展は、都市域およびその風下の対流性降水を増加させ、さらに内陸の降水量を減少させることが、統計的に示されています。この原因は、ヒートアイランドによる都市域での地上気圧の低下と、それによる海風・海風前線の強化と水蒸気輸送量の増大であることが分かりました。これらを含む多くの研究により、最近では東京が降水を増加させることに対してコンセンサスが得られてきたように感じます。現在の関心はエアロゾルの影響や極端降水に移りつつあり、それらの研究も精力的に行われています。ただ、本稿のテーマは温熱環境なので、都市降水の話はこれくらいにして、本稿を終わりにします。

図6 沿岸の大都市が夏季の短時間強雨に及ぼす影響
左図は海風と対流雲の概念図、右図は降水分布。右上図は都市あり実験での降水量分布、右下図は都市なし実験での降水量分布図。(Kusaka et al. 2019⁴²⁾の Graphical Abstract より)

謝辞

本研究の一部は、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(2-1905)により実施された。

参考文献

- Oleson, K. W., Bona, G. B., Feddema, J., and Jackson, T. "An examination of urban heat island characteristics in a global climate model", *International Journal of Climatology*, Vol. 31, pp. 1848-1865, (2011).
- McCarthy, M. P., Best, M. J. and Betts, R. A., "Climate change in cities due to global warming and urban effects", *Geophysical Research Letters*, Vol. 37, L09705, (2010)
- Kimura, F. and Takahashi, S., "The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area: a numerical experiment", *Atmospheric Environment*, Vol. 25B, pp. 155-164, (1991)
- Kanda, M., Inoue, Y., Uno, I., "Numerical study on cloud lines over an urban street in Tokyo", *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 98, pp. 251-273, (2001)
- Chen, F., Kusaka, H., Bornstein, R., Ching, J. and co-authors, "The integrated WRF/urban modeling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems", *International Journal of Climatology*, Vol. 31, pp. 273-288, (2011).
- Kusaka, H., Hara, M., and Takane, Y., "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", *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 90B, pp. 47-63, (2012)

- 7) Georgescu, M., Moustaoui, M., Mahalov, A., and Dudhia, J., "Summer-time climate impacts of projected megapolitan expansion in Arizona", *NATURE CLIMATE CHANG*, Vol. 3, pp. 37-41, (2013)
- 8) Georgescu, M., "Challenges Associated with Adaptation to Future Urban Expansion" *JOURNAL OF CLIMAT*, Vol. 28, pp. 2544-2563, (2015)
- 9) 池田亮作・日下博幸 「都市街区気象モデル City-LES の概要」, 本ヒートアイランド学会誌, Vol. 12, pp. 19-22 (2017)
- 10) Onihisi, R., Sugiyama, D., Matsuda, K., "Super-Resolution Simulation for Real-Time Prediction of Urban Micrometeorology", *SOLA*, Vol. 15, pp. 178-182, (2019)
- 11) NCAR, "WRF physics use survey – August 2015", https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrf_physics_survey.pdf, (2015)
- 12) Kusaka, H., H. Kondo, Y. Kikegawa, and F. Kimura A., "Simple Single-Layer Urban Canopy Model For Atmospheric Models: Comparison With Multi-Layer And Slab Models", *Bound. Layer Meteor.*, Vol. 101, pp. 329-358, (2001)
- 13) Martilli, A., Clappier, A., and Rotach, M. W., "An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models" *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 104, pp. 261-304, (2002)
- 14) Salamanca, F., Krpo, A., Martilli, A., "A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations – Part I. Formulation, verification, and sensitivity analysis", *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 99, pp. 331-344. (2010)
- 15) Takane, Y. and Kusaka, H., "Formation Mechanisms of the Extreme High Surface Air Temperature of 40.98C Observed in the Tokyo Metropolitan Area: Considerations of Dynamic Foehn and Foehnlike Wind", *American Meteorological Society*, Vol. 50, pp. 1827-1841, (2011)
- 16) Nishi, A. and Kusaka, H., "Effect of Foehn Wind on Record-Breaking High Temperature Event (41.1°C) at Kumagaya on 23 July 2018", *SOLA*, Vol. 15, pp. 17–21, (2019)
- 17) Nishi, A., Kusaka, H., Vitanova, L.L., and Imai, Y., "Contributions of Foehn and Urban Heat Island to the Extreme High-Temperature Event in Niigata City during the Night of 23–24 August 2018", *SOLA*, Vol. 15, pp. 132–136, (2019)
- 18) Tan, J., Zheng, Y., Tang, X., Guo, C., Li, L Song, G Zhen, X Yuan, D., Kalkstein, A, J., Li, F. and Chen, H., "The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai", *Int J Biometeorol*, Vol. 54, pp. 75–84, (2010)
- 19) Zhou, Y. and Shepherd, J. M., "Atlanta's urban heat island under extreme heat conditions and potential mitigation strategies", *Nat Hazards*, Vol. 52, pp. 639–668, (2010)
- 20) Li, D and Bou-Zeid, E., "Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves: The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts", *American Meteorological Society*, Vol. 52, pp. 2051-2064, (2013)
- 21) Ward, K., Lauf, S., Kleinshmit, B., Endlicher, W., "Heat waves and urban islands in Europe: A review of relevant drivers", *Science of the Total Environment*, Vol. 569-570, pp. 527-539, (2016)
- 22) Tewari, M., Salamanca, F., Martilli, A., Treinish, L. and Mahalov, A., "Impacts of projected urban expansion and global warming on cooling energy demand over a semiarid region", *Atmospheric Science Letters*, Vol. 18, pp. 419–426, (2017)
- 23) Lemonsu, A., Viiguié, V., Daniel, M. and Masson, V., "Vulnerability to heat wave: Impact of urban expansion scenarios on urban heat island and heat stress in Paris(France)", *Urban Climate*, Vol. 14, pp. 586-605, (2015)
- 24) Kusaka, H., Suzuki-Parker, A., Aoyagi, T., Adachi, S.A. and Yamagata, Y., "Assessment of RCM and urban scenarios uncertainties in the climate projections for August in the 2050s in Tokyo", *Climatic Change*, Vol. 137, pp. 427–438, (2016)
- 25) Yang, L., Niyogi, D., Tewari, M., Aliaga, D., Chen, F., Tian, F., and Ni, G., "Contrasting impacts of urban forms on the future thermal environment: example of Beijing metropolitan area", *Environmental Research Letters*, Vol. 11, 034018, (2016).
- 26) Iizuka, S., "Future environmental assessment and urban planning by downscaling simulations", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 181, pp. 69-78.
- 27) Adachi, S. A., Kimura, F., Kusaka, H., Inoue, T. and Ueda, H., "Comparison of the impact of global climate change and urbanization on summertime future climate in the

- Tokyo metropolitan area”, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 51, pp. 1441-1454, (2012)
- 28) Hamdi, R., Van de Vyver, H., De Troch, R. and Termonia, P., “Assessment of three dynamical urban climate downscaling methods: Brussels’s future urban heat island under an A1B emission scenario”, *International Journal of Climatology*, Vol. 34, pp. 978–999, (2014)
 - 29) Doan, V. Q. and Kusaka, H., “Projections of urban climate in the 2050s in a fast-growing city in Southeast Asia: The greater Ho Chi Minh City metropolitan area, Vietnam”, *International Journal of Climatology*. Vol. 38, pp. 4155–4171, (2018)
 - 30) Lee, H. S., Trihamdani, A.R., Kubota, T., Iizuka, S. and Phuong, T.T.T., “Impacts of land use changes from the Hanoi Master Plan 2030 on urban heat islands: part 2. Influence of global warming, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 31, pp. 95–108, (2017)
 - 31) Darmanto, N. S., Varquez, A. C. G., Kawano, N. and Kanda, M., “Future urban climate projection in a tropical megacity based on global climate change and local urbanization scenarios”, *Urban Climate*, Vol. 29, 100482, (2019)
 - 32) Krayenhoff, E. S., Moustauoi, M., Broadbent, A.M., Gupta, V. and Georgescu. M., “Diurnal interaction between urban expansion, climate change and adaptation in US cities”, *Nature Climate Change*, Vol. 8, pp. 1097–1103, (2018)
 - 33) Stwart, I. D. and Oke, T. R., “Local climate zones for urban temperatures studies”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 1879-1900, (2012)
 - 34) Ching, J., Mills, G., Bechtel, B., See, L., Feddema, J., Wang, X., Ren, C., and co-authors, “WUDAPT: An urban weather, climate, and environmental modeling infrastructure for the Anthropocene”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99, 1907-1924, (2018)
 - 35) Changnon, S. A., “METROMEX: A Review and Summary” Boston, MA, American Meteorological Society, (1981)
 - 36) Shepherd, M., “A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future”, *Earth Interactions*, Vol. 9, pp. 1-27, (2005)
 - 37) Niyogi, D., Pyle, P., Lei, M., Arya, S., Kishtawal, C., Shepherd, M., Chen, F., and Wolfe, B. “Urban modification of thunderstorms: An observational storm climatology and model case study for the Indianapolis urban region”, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 50, pp.1129–1144, (2011)
 - 38) Zhong, S. and Yang, X. Q., “Ensemble simulations of the urban effect on a summer rainfall event in the Great Beijing Metropolitan Area. *Atmospheric Research*”, Vol.153, pp. 318–334, (2015)
 - 39) Argüeso, D., Di Luca, A. and Evans, J. P., “Precipitation over urban areas in the western Maritime Continent using a convection-permitting model”, *Climate Dynamics*, Vol. 47, pp. 1143–1159, (2016)
 - 40) Fujibe, F., Togawa, H. and Sakata, M., “Long-term change and spatial anomaly of warm season afternoon precipitation in Tokyo”, *SOLA*, Vol. 5, pp. 17–20, (2009)
 - 41) Kusaka, H., Nawata, K., Suzuki-Parker, A., Takane, Y. and Furuhashi, N., “Mechanism of precipitation increase with urbanization in Tokyo as revealed by ensemble climate simulations”, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 53, pp. 824–839, (2014)
 - 42) Kusaka, H., Nishi, A., Mizunari, M., Yokoyama, H., “Urban impacts on the spatiotemporal pattern of short-duration convective precipitation in a coastal city adjacent to a mountain range, Vol. 145, 2237-2254, (2019)