T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	背景気候や地理条件を含めた包括的なヒートアイランド現象のメカニズムの考察
Title	Mechanism of the urban heat island considering geography and background climate
著者	浅見 真由, 仲吉 信人, Alvin C. G. Varquez, 神田 学
Author	Asami, M., Nakayoshi, M., Varquez, A.C.G., Kanda, M.
出典 / Citation	土木学会論文集B1(水工学), Vol. 75, No. 2, pp. I_37-I_42
Citation(English)	Journal of Japan Society of Civil Engineers. Ser. B1, Hydraulic engineering, Vol. 75, No. 2, pp. I_37-I_42
発行日 / Issue date	2019, 8
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は土木学会に帰属します。 Copyright (c) 2019 Japan Society of Civil Engineers.

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

土木学会論文集B1(水工学) Vol.75, No.2, I_37-I_42, 2019.

背景気候や地理条件を含めた包括的なヒートアイランド現象のメカニズムの考察

浅見　真由[1]・仲吉　信人[2]・Alvin C. G. Varquez[3]・神田　学[4]

[1]学生会員　東京理科大学　理工学研究科土木工学専攻（〒279-8510 千葉県野田市山崎 2641）
E-mail: 7619501@ed.tus.ac.jp

[2]正会員　博（工）　東京理科大学准教授　理工学部土木工学科（同上）
E-mail: nakayoshi@rs.tus.ac.jp

[3]正会員　博（工）　東京工業大学特任講師　環境・社会理工学院
（〒279-152 8522 東京都目黒区大岡山二丁目 12-1）
E-mail: varquez.a.aa@m.titech.ac.jp

[4]正会員　博（工）　東京工業大学教授　環境・社会理工学院（同上）
E-mail: kanda.m.aa@m.titech.ac.jp

ヒートアイランド現象は都市化の進展によって生じているが，その地域の地理的な条件や背景気候など，都市により異なる様々な要素の影響を受けていると考えられる．しかし，その包括的なメカニズムは未だに明らかでない．そこで本研究では，数値シミュレーションを用いて世界の複数都市のヒートアイランド現象を再現し比較することで，都市化の影響に加え，地理・気候条件が及ぼす影響を明らかにすることを試みる．ヒートアイランド強度は，特に風速との間に強い負の相関が確認された．これは風速が強いほど，都市の熱が周囲に移流されることによるものであると考えられる．風速はモンスーンなどの全球規模の風速場や，都市周辺の地理など影響や，建物による粗度の影響も受けると考えられ，包括的な指標であると言える．

Key Words: *Global urban climatology, urban heat island, WRF, geography, background climate*

1. 序論

世界の各地で都市への人口の集中が進んでいる．1950年には30%程度であった都市部人口は，2050年には68%まで達し，純粋な人口増加と相まって都市部人口は25億人増加するという予測がされている[1]．その結果，2030年には世界で43のメガシティ（都市圏人口が1,000万人以上の都市を指す）が主に途上国に存在するとみられている[1]．そのような状況の中で，現在世界中の都市において，郊外に比べて都市の気温が高くなるヒートアイランド現象が確認されている．また，それに伴い熱中症や就寝時の室温の上昇による睡眠障害[2]など，都市の熱環境の変化による被害も報告されており，ヒートアイランド現象が熱関連死亡率を増加させているという調査結果[3]もある．これらのことから，ヒートアイランド現象に対して適切な対策を講じることは急務であり，そのためにはまず現象を正確に把握する必要がある．

これまでの研究により，ヒートアイランド現象の形成には人工排熱や地表面被覆の変化による蒸発散量の減少，建物による天空率の減少や熱容量の大きい建材使用量の増加[4]など，都市化に伴う要因が寄与することが知られている．Van Hove et al.[5]はロッテルダムにおける観測から，ヒートアイランド強度（UHI）の都市内変動は，平均建物高さや建物表面積率，不浸透面積率，植生比率と有意な関係にあることを示した．一方でUHI分布は，都市域を流れる川の影響[6]や，海岸からの距離や標高などの地理的な条件によって分布が異なること[7]も確認されている．また，同程度の規模の都市でもヒートアイランドの現れ方は様々であることから，各地域の地理的な条件や背景気候も影響を及ぼしていることが考えられる．しかし，そのメカニズムや定量的な影響，また様々な要因間の関係はほとんど解明されていない．現地での気象観測データに基づいた研究では，観測地点の代表性の問題や，測器の違いによる観測精度のばらつきなどの影響で，地点間の比較が難しいのが現状である．そこで，気象シミュレーションを用いて条件の異なる複数都市を同一基準

で比較することが有効であると考えられる．これまでは都市気象計算に必要なデータベースが限られていたが，近年，都市気象学をグローバル展開する試み [8]の中で，全球規模で高解像度人工排熱・建物幾何パラメータデータベースの構築 [9,10,11,12]，それらを取り込む都市キャノピーモデルの整備 [13]が行われ，全球スケールで都市気象計算が可能になりつつある．Varquez et al.[14]は，アジアのメガシティを対象として，各都市の地理・気候条件の下での人工排熱の及ぼす影響評価を行った．

本研究では，世界の広い地域に分布するメガシティを対象として，ヒートアイランド現象のシミュレーション計算を行い，様々な要因の包括的な評価を試みる．ヒートアイランド現象の地域間の違いに着目し，都市化による要因やその地域の地理条件，背景気候の及ぼす影響を調べる．

2. 研究手法

(1) 計算条件

領域気象モデル WRF を用いて気象計算を行う．本研究では，建物幾何パラメータと人工排熱量の空間分布データを組み込むことを可能にした都市キャノピーモデルを使用している．モデルの詳細については Varquez et al.[13]を参照されたい．建物幾何パラメータと人工排熱量には，それぞれ河野ら [10]，Dong et al.[9]の手法によって作成されたデータベースを使用する．これは対象とする全都市において，ともに 30 秒の空間解像度を持つ．また，土地利用区分や緑被率は MODIS による空間解像度 15 秒のデータを使用する．

初期値・境界値は，米国国立環境予測センター（NCEP）の全球客観解析値（FNL）を用いて，2006 年から 2015 年の 10 年分のデータを各月毎，また 0 時，6 時，12 時，18 時の 6 時間毎にアンサンブル平均して作成する．この境界値を繰り返し用いて複数日計算することで，各月の平均的な気候の再現を試みている．本手法の詳細は Varquez et al.[14]を参照されたい．本研究では，計算期間を助走期間 18 時間を含んだ 3 日間とし，最小計算領域の空間解像度を 2 km，出力時間間隔を 1 時間とする．また，2 月と 8 月を対象として解析を行う．

(2) 対象都市

図-1 に示す 28 都市を対象都市とする．図中の黒枠，青枠，赤枠で囲まれた範囲がそれぞれ第 1 領域（解像度 40 km），第 2 領域（10 km），第 3 領域（2 km）を示しており，南北アメリカ，ヨーロッパ・アフリカ，アジア 2 地域の計 4 ケースを第 1 領域とするシミュレーションを行う．数字は都市の識別コードであり，**図-2** のそれと対応する．対象都市は，国連の 2015 年都市圏人口予測 [15]の上位の都市を選定した．計算領域は都市の広がりを十分考慮できるように設定した．都市間の距離が近いため，Rio de Janeiro は San Paulo の，Shenzhen は Guangdong の計算領域に含まれる．

(3) 計算ケース

上記の計算領域に対し，それぞれ都市ありケースと都市なしケースの 2 ケースについてシミュレーションを行う．都市なしのケースでは，土地利用区分が都市である格子を，半径 500 km 内で都市の次に多い土地利用区分に変換して計算を行う．これにより各地域の都市化前の土地利用状況の再現を試みている．

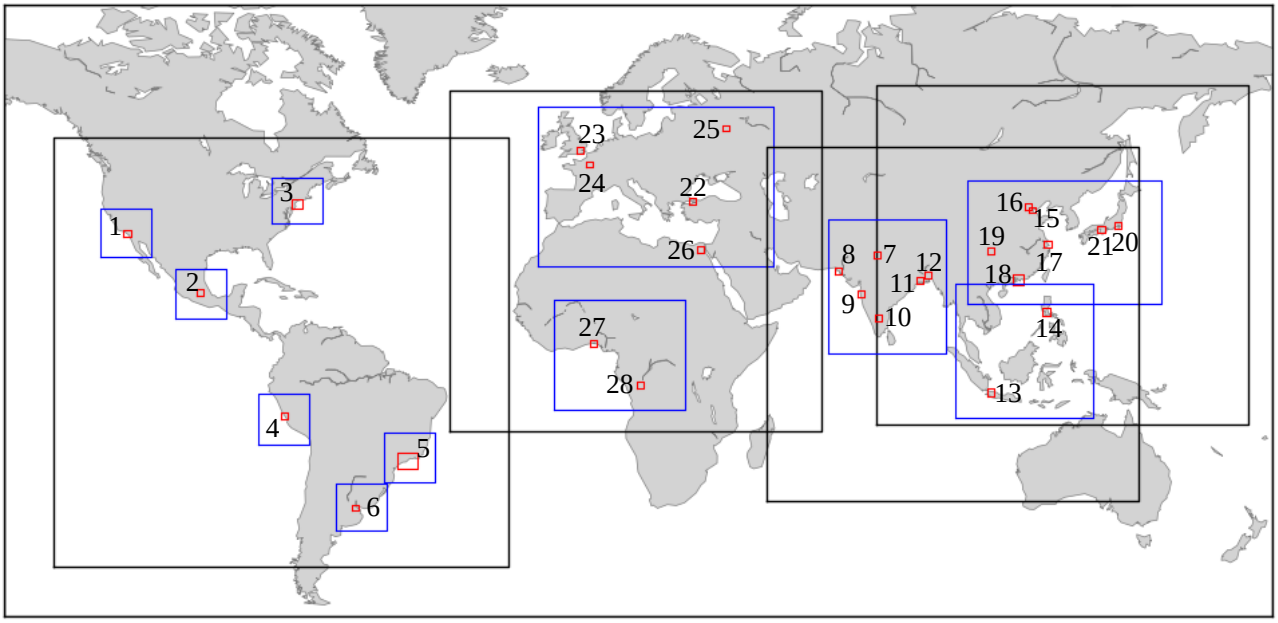


図-1 対象都市および計算領域

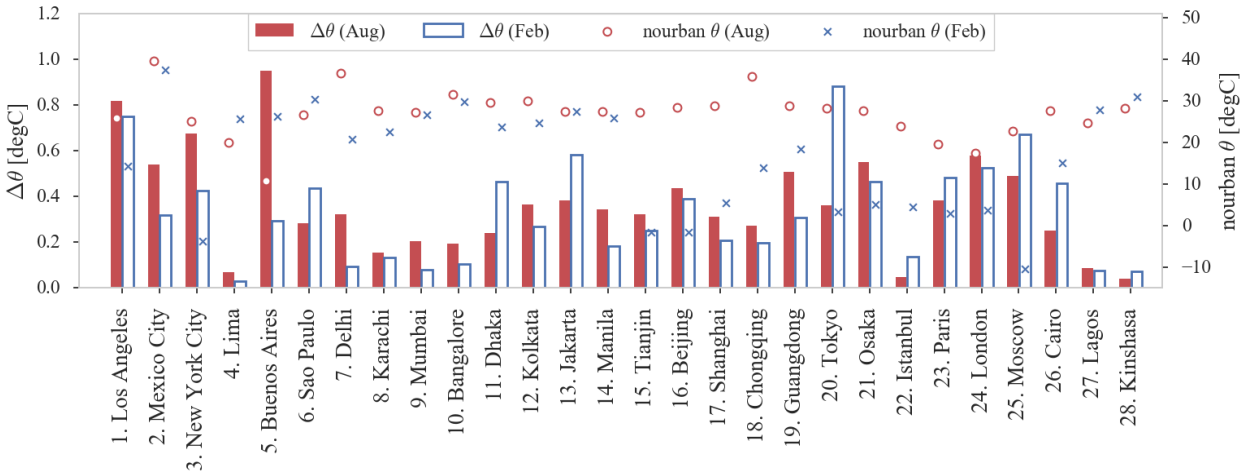


図-2　各都市の UHI と都市なし平均温位

本研究では，モデルの鉛直第 1 層における温位の 2 ケースの差をヒートアイランド強度（UHI）として解析を行う．

3.　結果と考察

(1)　各都市の UHI

図-2 に各都市の都市域平均（土地利用が都市であるセルの平均）・日平均した UHI を示す．棒グラフで UHI（左軸）を示し，プロットで都市なしケースの温位の平均値を示す（右軸）．UHI に着目すると，都市間で大きな差異がみられる．また，8 月と 2 月で傾向が異なっており，都市化度のみの影響で UHI が決まっているとは考えにくい．そこで以降の章では，この都市間の違いが何の要素の影響によって生じているのか考察を行う．

(2)　UHI の要因分析

本研究では，ヒートアイランド現象に影響を及ぼす要因を包括的に議論するため，都市化に伴う要因と，地理的な要因，気候的な要因の 3 つに分類して考察を行う．対象都市それぞれの都市域平均・日平均した UHI と各要素との散布図を作成し，その関係を考察する．その一部を**図-3** に示す．また，**表-1** にそれぞれのスピアマンの順位相関係数を示す．

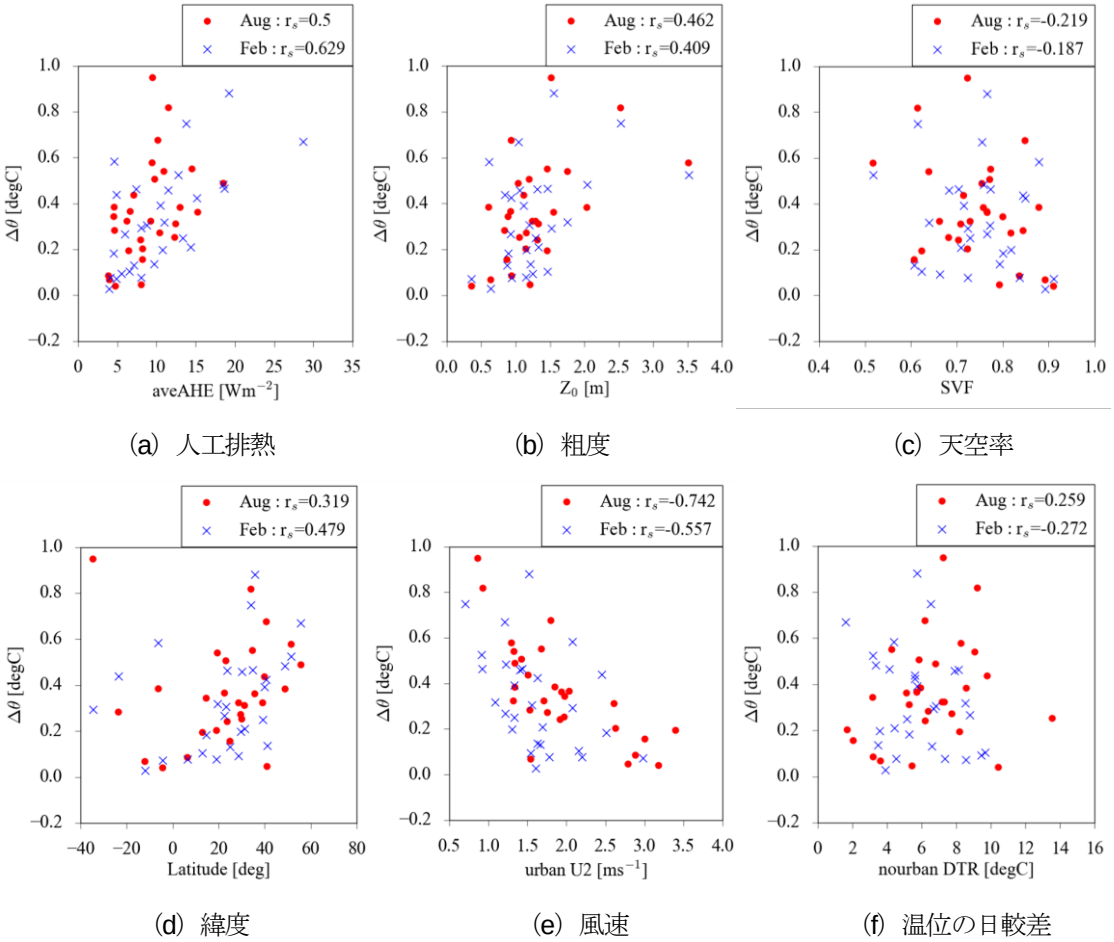
a)　都市化による要素

都市化による要素として，人工排熱，粗度，天空率に着目する．**図-3**（a）に UHI と人工排熱の関係，（b）に UHI と粗度の関係，（c）に UHI と天空率の関係を示す．

人工排熱は，相関係数が 8 月，2 月それぞれ 0.500，0.629 となり，ともに UHI と正の相関を示している．昇温量に対する人工排熱量の寄与が大きいことが示唆された．8 月よりも 2 月に顕著に現れているのは，解析対象都市の多くが北半球に位置しており，北半球の都市が冬季であることが関係していると考えられる．冬季には地表面からの顕熱フラックスが減少し，人工排熱の影響が相対的に大きくなることや，冬の暖房使用量が夏の冷房使用量を上回る都市が存在することが影響している可能性がある．

粗度について，理論的には粗度の大きい都市ほど周囲から吹き込む風が弱められるため，風による熱の移流が妨げられることや，粗度が大きくなると地表面と大気の間の熱交換が促進されて顕熱フラックスが増加することが考えられる．この 2 つの影響により粗度と UHI は正の関係にあることが推測されるが，本研究の結果は**図-3**（b）に示すように，8 月，2 月の相関係数はそれぞれ 0.462，0.409 とあまり強い関係は見られなかった．そこで，各都市で都市内の粗度分布と UHI の関係を確認すると，ヒートアイランド現象がほとんど発現していない一部都市を除いて，すべての都市で夜間に強い正の相関が見られた．**図-4** に例として，夜間における Los Angeles の都市域内での粗度分布に対する UHI 分布の関係を示す．各粗度域に対応するグリッド数をヒストグラムにし，そのグリッドの UHI を箱ひげ図で表わしている．箱ひげ図が右肩上がりになっていることから，粗度と UHI に強い正の相関があることがわかる．このことから，都市内では地理的な条件や気候条件の変化が比較的小さいため粗度の影響が顕著に現れるが，都市間の比較では他の要因の影響の方が大きいために，粗度の違いによる寄与は小さくなったと考えられる．

天空率は，相関係数が 8 月，2 月でそれぞれ-0.220 と-0.187 となり，UHI との関係はほとんど見られなかった．都市の天空率減少に伴う夜間の放射冷却の阻害の影響は，都市間の比較においては大きくないことが示唆された．



(a) 人工排熱　(b) 粗度　(c) 天空率

(d) 緯度　(e) 風速　(f) 温位の日較差

図-3　UHI と各要素の関係

表-1　UHI と各要素の順位相関係数

	人工排熱	粗度	天空率	緯度	標高	海岸からの距離	風速	温位の日較差	比湿
8 月	0.500	0.462	-0.220	0.319	-0.190	-0.108	-0.742	0.259	-0.261
2 月	0.629	0.409	-0.187	0.479	-0.154	0.0613	-0.557	-0.272	-0.420

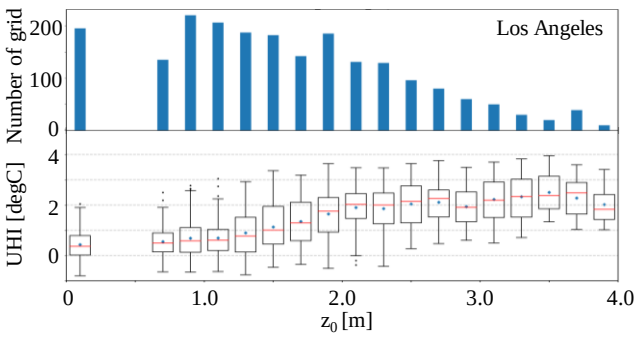


図-4　都市内の粗度分布に対する UHI の分布（夜間，Los Angeles）

b)　地理条件

地理的な条件としては，緯度，標高，海岸からの距離に着目する．

図-3（c）に UHI と緯度の関係を示す．緯度は 8 月，2 月ともに UHI と弱い正の相関（相関係数 0.319，0.479）を示している．緯度によって異なるパラメータとしては日の長さや太陽高度が考えられる．しかし，日の長さは，2 月と 8 月で緯度に対する傾向が逆転するにもかかわらず，どちらでも相関が確認されていることから，UHI に対する影響はあまり大きくないと考えられる．太陽高度に着目すると，高緯度地域では太陽高度が低い時間が長く続くため，都市の建物壁面での日射の吸収率が増加し，夜間の顕熱フラックスが増加する．一方，都市なしケースでは，同じ時間帯の日射の吸収率が高緯度地域ほど小さくなるため，特に夜間において都市ありケースと都市なしケースの顕熱フラックスの量の差が大きくなり，高緯度地域での UHI を強めることにつながっていると考えられる．また，他にも風速と人工排熱も緯度との関係がみられたため，それらの影響も含んでいると考えられる．低緯度に風速の強い地域が多いため，風速とは負の相関がみられ（風速と UHI の関係の詳しい考察は c）で行う），人工排熱とは正の相関がみられた．人工排熱との

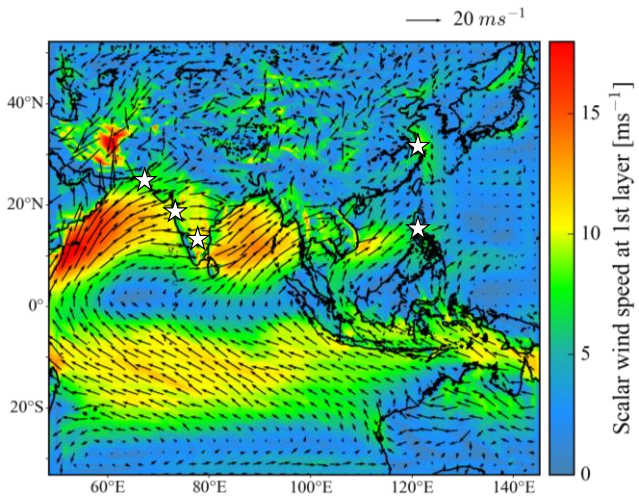


図-5　東・東南・南アジアにおける第一層の風速場
(8 月の月平均・日平均)

相関は 2 月により強いため，8 月より 2 月に顕著な関係が見られたのはその影響であると考えられる．

標高・海岸からの距離（図省略）については，メガシティに分類される都市が標高の低い沿岸域に立地している傾向が強いため，都市間の分布に偏りが大きく，関係が見られなかった．

c)　気候条件

気候条件としては，ケッペンの気候区分，風速，温位の日較差，比湿に着目する．風速には都市ありケースの結果，温位の日較差と比湿には都市なしケースの結果を使用する．

ケッペンの気候区分と UHI との有意な関係は確認できなかったため（図省略），以下各気象因子に着目する．

図-3（d）に UHI と風速の関係を示す． 風速については，相関係数が 8 月，2 月でそれぞれ-0.742，-0.557 と強い負の相関が確認された．風による移流の効果によって，都市の昇温分が周囲に輸送されるため，風速の強い地域ほど UHI が小さくなったと考えられる．都市化による要素の考察の中で，都市内において粗度と UHI の関係が見られない都市が確認されたと述べたが，それらの都市では強い風速により粗度の大きい場所でも都市の昇温が移流され，都市域においてヒートアイランドが発現しなかったとみられる．

風速を決める最も大きい要素は，背景気候による地域特有の風速場である．風速が強い都市のほとんどでは，一日中同じ方角からの風が確認されており，特に 8 月は東，東南，南アジアに位置する 8. Karachi，9. Mumbai，10. Bangalore，14. Manila，17. Shanghai で，**図-5** に示すようにモンスーンにより風速が強くなっている（図中に星印で都市の位置を示す）． 2 月より 8 月において関係がより顕著に現れたのはこのためであると考察される．22. Istanbul，23. Lagos，28. Kinshasa の 3 都市も 8 月に 1 日中同じ方角からの風が吹いているが，モンスーンのような大規模な風速場は見られず，その地域に特有の気象現象であると考えられる．また，同時に，風速は都市の粗度の影響も受ける．粗度が大きいほど水平方向の風速は弱められる関係にある．よって，風速は全球規模の風速場や都市周辺の地理，さらには建物パラメータの影響を受けた要素であると言える．風速が強いほど都市の昇温量が小さくなる傾向にあることが示唆された．

比湿と UHI の関係は，8 月にはほとんど見られなかった（図省略）．2 月には弱い負の相関（相関係数-0.420）が確認されたが，比湿は緯度と強い負の相関があるため（図省略，相関係数-0.914），これは緯度の影響によるものである．

温位の日較差の関係を**図-3**（e）に示す．Varquez et al.[16] は世界の地上気温観測データの解析より，気温の日較差が UHI を説明する最も良い指標であると言及しているが，本研究では他の影響因子に比べて支配的な要因であるとは言えない．Varquez et al.[16] とは UHI の定義が異なることと，彼らが通年のデータを用いていることが本結果との違いにつながった可能性がある．

4.　結論

本研究では，気象シミュレーションにより世界の複数都市のヒートアイランド現象を再現し比較することで，現象の形成に及ぼす様々な要因の影響を包括的に把握することを試みた．主な結果を以下にまとめる．

i. 人工排熱と風速が UHI との間に顕著な関係を持つことが明らかになった．これは，昇温量に対する人工排熱量の寄与が大きいことや，移流による都市から周囲への熱輸送量が風速によって大きく異なり，その影響が他の因子に比べて大きいことを示している．

ii. 風速は，モンスーンなどの背景気候の風速と，都市パラメータである粗度によって決まると考えられるため，UHI の包括的な指標であると言える．

iii. 粗度と UHI の関係は，各都市の都市内の分布に着目すると，正の相関が確認されたが，都市間の比較ではあまり強い関係は見られなかった．背景気候としての風速が大きく違わない条件であれば，粗度の影響はより強く現れることが示唆された．

iv. ヒートアイランド現象の形成メカニズムは，まず風速により大きく左右され，次に粗度の影響が現れるというように，様々な影響が階層的に現れている可能性が考えられる．

今回の対象都市は，風速が強い地域では都市化度が小さい傾向があったため，風速が大きいほどヒートアイランド強度が小さくなるという仮説を検証するためには，風速が強く都市化度の高い都市（Singapore や Bangkok など）を対象都市に加えて解析を行う必要がある．観測値からも同様の傾向が確認されるかどうかの検証も行っていく必要がある．

謝辞：本研究は科学研究費補助金若手研究（課題番号：18K13840　代表：仲吉信人），基礎研究 A（課題番号：17H01292　代表：神田学）の支援を受け実施された．ここに記して謝意を表す．

参考文献

1) United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2017). World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables. Working Paper No. ESA/P/WP/248.
2) 岡野　泰久，井原　智彦，玄地　裕：インターネット調査を用いた夜間のヒートアイランド現象による睡眠障害の影響評価，日本ヒートアイランド学会論文集 Vol.3，2008.
3) Tan, J., Zheng, Y., Tang, X., Guo, C., Li, L., Song, G., Zhen, X., Yuan, D., Kalkstein, A. J., Li, F. :The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai, Int J Biometeorol. ,2010, Jan, 54(1):75-84.
4) 川端康弘，清野直子，田中泰宙，青柳曉典：都市における冬季夜間の気温低下抑制の要因に関する感度分析，日本ヒートアイランド学会論文集，Vol. 13，2018.
5) L.W.A. van Hove, C.M.J. Jacobs, B.G. Heusinkveld, J.A. Elbers, B.L. van Driel, A.A.M. Holtslag: Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration, Building and Ennvironment, 83, 91-103, 2015.
6) Juan P. Montavez, Antonio Rodriguez, Juan I. Jimenz: A study of the Urban Heat Island of Granada, International Journal of Climatology, Vol. 20, Issue 8, 2000.
7) P. Vahmani, G. A. Ban-Weiss: Impact of remotely sensed urban vegetation fraction on simulation of urban climate in WRF-urban canopy model: A case study of the urban heat island in Los Angeles, J. Geophys. Res. Atmos., 121, 1511-1531, 2016.
8) Varquez, A.C.G.: Global Urban Climatology, Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources, 29-5, pp.313 – 325, 2016.
9) Dong Y., Varquez A.C.G., Kanda M.: Global anthropogenic heat flux database with high spatial resolution, Atmospheric Environment, 150, pp.276-294, 2017.
10) 河野なつ美，董玥，Yucel, M，Varquez, A. C. G.，神田学：グローバル都市気象学 – 都市温暖化の汎用解析手法の提案，土木学会論文集 B1（水工学），Vol. 72，No. 4，I_97-I_102，2016.
11) Darmanto, N.S., Varquez, A.C.G., Kanda, M.: Urban roughness parameters estimation from globally available datasets for mesoscale modeling in megacities, Urban Climate, 21, pp.243-261, 2017.
12) 真壁拓也，仲吉信人，Varquez, A. C. G., 神田学：気象解析のための全日本都市幾何データベースの構築と世界への拡張可能性，土木学会論文集 B1（水工学），Vol. 70，No. 4，I_331-I_336，2014.
13) Varquez, A. C. G., Nakayoshi, M., and Kanda, M.: The effects of highly detailed urban roughness parameters on a sea-breeze numerical simulation, Boundary-Layer Meteorol, No. 154 (3), pp. 449-469, 2014.
14) Varquez, A. C. G., Kawano, N., Kanda, M., Nakayoshi, M.: Numerical investigation of anthropogenic heat emission impacts on large Asian cities, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 74, No. 5, I_1177-I_1182, 2018.
15) United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2014). World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Online Edition.
16) Varquez, A. C. G., Manabu, K.: Global urban climatology: a meta-analysis of air temperature trends (1960–2009), npj Climate and Atmospheric Science 1, Article number: 32, 2018.

(Received May 31, 2019)
(Accepted August 7, 2019)

MECHANISM OF THE URBAN HEAT ISLAND CONSIDERING GEOGRAPHY AND BACKGROUND CLIMATE

Mayu ASAMI, Makoto NAKAYOSHI, Alvin C. G. VARQUEZ and Manabu KANDA

The urban heat island (UHI) is caused by the progress of urbanization, but is considered to be influenced by various factors that differ depending on the cities, such as the geography and the background climate. However, the comprehensive mechanism is not clear yet. In this study, we tried to clarify the influence of not only urbanization, but geography and background climate by comparing the heat island phenomena of multiple cities in the world using numerical simulation. The wind speed is the main contributor to the urban heat island intensity; the heat of the city is transferred more effectively to the surrounding area as the wind speed is stronger. The wind speed is considered to be a comprehensive indicator reflecting the effect of geography around the city, and the roughness of the buildings.