T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	グローバルな都市気候解析のための 都市化前土地利用データベースの構築
Title	Construction of land use database before urbanization for global urban climate analyses
著者	成田 悠理, Alvin C.G. VARQUEZ, 仲吉 信人, 神田 学
Author	Yuuri Narita, Alvin C.G. Varquez, Makoto Nakayoshi, Manabu Kanda
出典 / Citation	土木学会論文集B1(水工学), Vol. 75, No. 2, pp. I_1039-I_1044
Citation(English)	Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 75, No. 2, pp. I_1039-I_1044
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 (Tokyo Institute Research Repository)

土木学会論文集B1(水工学) Vol.75, No.2, I_1039-I_1044, 2019.

グローバルな都市気候解析のための都市化前土地利用データベースの構築

成田　悠理[1]・Alvin C.G. VARQUEZ[2]・仲吉　信人[3]・神田　学[4]

[1] 学生会員　東京工業大学　環境・社会理工学院（〒152-8522 東京都目黒区大岡山二丁目 12-1）
E-mail: narita.y.ae@m.titech.ac.jp

[2] 正会員　工博　東京工業大学特任講師　環境・社会理工学院（同上）
E-mail: varquez.a.aa@m.titech.ac.jp

[3] 正会員　工博　東京理科大学准教授　土木工学科（〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641）
E-mail: nakayoshi@rs.tus.ac.jp

[4] 正会員　工博　東京工業大学教授　環境・社会理工学院（〒152-8522 東京都目黒区大岡山二丁目 12-1）
E-mail: kanda.m.aa@m.titech.ac.jp

都市温暖化の影響を分析するうえで都市のヒートアイランド強度（Urban Heat Island Intensity: UHII）を推定し，それのメカニズムを解明することは必須である．しかし，既往の数値シミュレーションによる研究でされてきた UHII を推定する手法は，都市化前の土地利用を植生に置き換えるなど単純化されており，適切に UHII を表していない．

そこで本研究では UHII を数値的に推定するために必要となる，都市化前土地利用全球データベースを構築する．本データベースにより，現在の土地利用を用いた都市気象シミュレーションと都市化前土地利用を用いた気象シミュレーションの比較を可能とする．35 の大都市を対象した 2 種のシミュレーションを行って UHII の傾向を調べた結果，多くの都市で日中と夜間の双方で気温上昇がみられた．また，UHII は地形，建物幾何などに依存することが分かった．

Key Words: *Urban Climate Modelling, Urban Heat Island, Weather Forecasting, Global Cities*

1. 研究背景

都市ヒートアイランド（Urban Heat Island: UHI）による気温上昇量は従来の気候学研究の解析から排除されてきた．しかし，人口が集中して分布する都市[1]では，気候変動によって極端気象現象の発生頻度が増加するなど，被災リスクが増大する可能性が懸念される．また，都市気温上昇量を考慮しない従来のアプローチでは，都市温暖化という事象が孕む熱環境問題や水害といった潜在的リスクを適切に評価することはできない．そのため，今後の地球環境研究において，都市影響を含めた気温上昇に着目する必要性が指摘されている[2]．

先行研究では，先進国の大都市における UHI に関する研究が行われてきた[3]．一方，急激な発展が予想される発展途上国の大都市では，今後の地球温暖化研究やリスク強化の鍵を握ると考えられるにも関わらず，UHI の研究は殆どされていない．また，UHI に対する都市要因の検討が進んでいる一方，都市ごとに異なる地表面の蒸発量，アルベドなどを考慮した地理的視点や背景気候を踏まえた議論は殆どされていない．UHI の形成要因を定量化する研究が必要であり，それには都市形態や人工排熱のデータセットが地球規模で必要となる． Varquez[2]はグローバル都市気象学を提案し，建物幾何[4]，[5]や人工排熱[6]データベースを全球規模で構築する手法を開発している．

グローバル都市気象学において，都市のヒートアイランド強度（Urban Heat Island Intensity: UHII）を推定する手法は二種類ある．一つは，都市と郊外の気温差をとる古典的手法，もう一つは気象モデルを用い，土地利用を都市から非都市に代え計算し，両者の気温差をとる手法である． Varquez[2]は前者の手法を用いて複数都市の UHII の傾向を調べている[7]．しかしこの手法では，地形，水域，および市街地自体の風上・風下の影響により，UHII の過小評価や過大評価に繋がる．後者の手法は，適切に UHII を見積もることができる理想的な手法であるとされてきた[8]．しかし，非都市の土地利用を適切に選定し

なければ蒸発量や放射収支の誤評価に繋がり，UHII を正しく評価することができない．UHII を正確に評価するために，都市を全て同じ植生に置き換えるのではなく，各都市に適した都市化前の土地利用データを構築することが不可欠であるが，その困難さから，後者の手法を用いた複数都市を対象とする UHII 研究はされてこなかった．

本研究では UHII 推定に適したグローバルな都市化前土地利用データを構築する手法を提案する．加えて，現在の都市気象の計算結果と，構築した都市化前土地利用においての気象の計算結果を比較し，人口集中の著しい大都市 35 地点における UHII の推定を行い，UHII の要因分析を行う．

2. 土地利用データベース及び都市化前土地利用データベースの構築

(1) 土地利用データ諸元

MODIS（中分解能撮像分光放射計）の土地被覆データを解析に用いる．MODIS とは，NASA の地球観測衛星 Terra/Aqua に搭載されている NASA/GSFC により開発された光学センサの名称である．MODIS の観測結果は，陸域では土地利用の変化や砂漠化など地球環境の把握などに使われている．本研究では空間解像度 15 秒の土地利用データを用い，都市化前土地利用データベースを構築する． MODIS データの土地被覆は 20 のカテゴリー（図-1）に分類されている．データの扱いを容易にするため，MODIS データを分割し，カテゴリー毎のラスタ形式へ変換を行う． 使用した MODIS データの全範囲における総グリッド数は 86400×86400 である．

(2) 都市カテゴリーの置換

アメリカエネルギー省オークリッジ国立研究所が開発した LandScan™ の 2013 年 global population database を使用し，1000 人/km^{2}以上を都市とみなして新たな都市カテゴリーラスタデータを作成した． このように人口密度を考慮したことにより，人が生活している土地を実測値として都市と見積もることが可能となった．MODIS データの都市カテゴリーを作成した都市カテゴリーで置換し，新たな土地利用データを得た（以下，”修正 MODIS データ”と呼ぶ）．

	Evergreen Needleleaf Forest		Permanent Wetlands
	Evergreen Broadleaf Forest		Croplands
	Deciduous Needleleaf Forest		Urban
	Deciduous Broadleaf Forest		Natural Vegetation
	Mixed Forests		Snow and Ice
	Closed Shrublands		Barren
	Open Shrublands		Water
	Woody Savannas		Wooded Tundra
	Savannas		Mixed Tundra
	Grasslands		Barren Tundra

図-1　20 の土地被覆カテゴリー

(3) 都市化前土地利用データベースの構築手法

UHII を見積もるために都市化前土地利用データベースを作成する．それぞれの都市において都市が形成された年代は大きく異なり，具体的な年数で都市化を定義することは不可能である．そのため本研究では，現在において都市化されている部分を，それぞれの都市に見合った適切な都市以外の土地被覆カテゴリーに置き換えたものを都市化前土地利用として定義した．

都市化前の土地利用データを構築するために，過去の土地利用状況のデータベースを使用する．The Global Land Cover by National Mapping Organizations の 2003 年の MODIS データを使用した（以下，”2003 年 MODIS データ”と呼ぶ）．土地利用データの年代は古いほど好ましく，2003 年 MODIS データは入手できた最も古い土地利用データである．土地被覆は修正 MODIS データと同様に 20 のカテゴリーに分類されている．修正 MODIS データと同様，2003 年 MODIS データを空間解像度 15 秒のラスタ形式へ変換し解析に用いる．

都市化前土地利用データベースの構築手法を示す．修正 MODIS データにおいて，都市カテゴリーのグリッドのみを抽出したラスタデータ（A_1）と，Water と都市カテゴリーを除いたグリッドを全て抽出したラスタデータ（A_2）を作成する．そして A_1 を 2003 年 MODIS データと重ね合わせる．修正 MODIS データで都市域であるグリッドを抽出し，新たなラスタデータを作成する（B）．この B は，2003 年において都市を表すグリッド（B_1）と，2003 年 MODIS データの時点で都市化されていないグリッド（B_2）で構成されている．それぞれのラスタデータを図-2 に示す．

この B を用いて，修正 MODIS データにおいて都市を表すグリッドを，都市以外の都市化地利用データに置き換えていく．その際，2 つの手順が必要となる．それぞれの手法を具体的に示す．

まず手順 1 を示す（図-3 上図）．B 内の都市グリッド（C）を一つ選択する．その C を中心にした半径約 14km 内において，B_2内で最多の土地利用カテゴリーを計算する．様々な探索半径を検討した結果，都市化前土地利用を最も適切に再現できる値として半径 14km を選定した（4 章を参照）．算出されたカテゴリーに C を置き換える．これを B_1の都市グリッドが全て都市以外のカテゴリーに置き換わるまで繰り返す．手順 1 の手法は，都市カテゴリーを置換する際にその都市付近の過去の土地利用データを考慮するため，都市化以前を評価するのに適した手法と言える．

手順 1 の手法上，探索範囲内に B_2の非都市土地利用が存在せず，都市化前土地利用に変換できない孤立した都市グリッドが残される．その孤立した都市グリッドを変換するために，手順 2 を用いる（図-3 下図）．データ B 内の孤立した都市グリッド（D）を一つ選択する．その D を中心にした半径 14km 内において，A_2内で最多の土地利用カテゴリーを計算する．そうして算出されたカテゴリーに D を置き換える．これを B 内の孤立した都市グリッドが全て都市以外のカテゴリーに置き換わるまで繰り返す．手順 2 の手法を用いることで，都市カテゴリーの付近に過去の土地利用データが無いケースにおいても，その周囲の現在の土地利用データにより，都市化前土地利用データの構築を行うことができる．

以上の手法を用いて都市化前土地利用データベースの構築を行った．

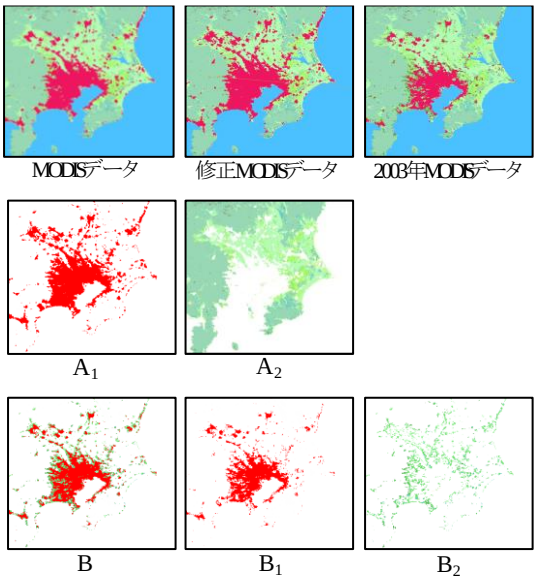

図-2　作成した 7 種類のラスタデータ
土地利用の判例は図-1 と対応する

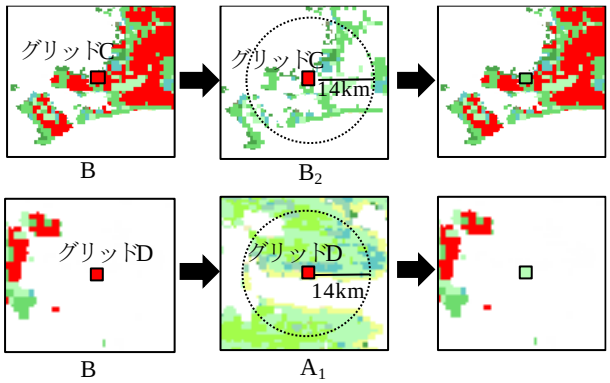

図-3　都市化前土地利用データベース構築手法
手順 1（上図），手順 2（下図）
土地利用の判例は図-1 と対応する

3.　解析手法

本研究では非静力学領域気象モデルである WRF-ARW Model v3.3.1 を使用した．WRF については Skamarock et al[9] を参照されたい．

a)　対象都市

United Nations の Population Division（2018）を用い，地理的分散を考慮した，人口集中の著しい大都市 35 地点を抽出した（図-4）．図-4 中の赤枠は解析対象領域を示しており，格子解像度は全ての都市で 1 km である．

b)　都市パラメータ

人工排熱データ[6]，および河野ら[5] の手法より構築された都市幾何パラメータを計算に組み込んだ．上記のパラメーターは全てグローバルデータであり，空間解像度は 30 秒である．人工排熱は各月 1 時間解像度で整備されている．

c)　境界条件

初期値・境界値には NCEP Final analysis（空間解像度：1 度×1 度，時間解像度：6 時間，期間：2006 年 1 月から 2015 年 12 月）を用いる．UHII の年間変化の影響を調査するため，複数の都市を対象とした気候シミュレーションを実施する必要がある．一方で，全ての都市で連続した複数年に渡るシミュレーションを実行すると，多大な計算コストが必要となる．そこで，境界値を 2006 年から 2015 年までの 10 年間分アンサンブル平均し，各月 0 時から 18 時までの 6 時間間隔の境界値を作成する．例えば，1 月 0 時は，NCEP Final analysis からダウンロードされた全ての 1 月の 0 時が平均されている．この境界値を用い，一つの都市に対し各月で同じ境界条件を使い 3 日間の計算を実施する．これを 12 か月分実施した．また，最初の 24 時間は助走期間として残り 2 日分の結果

図-4　対象都市 35 地点

を気候値として用いる．これにより計算コストを抑えた気候計算が可能となる．本手法の詳細は Varquez et al[10]を参照された．

d) 計算ケース

現在 MODIS 土地利用，人工排熱，都市幾何パラメータを考慮する計算（urban ケース）と，都市化前土地利用データベースを用い，都市を考慮しない計算（no-urban ケース）を実施する．両ケースの気温差を UHII として評価する．urban ケースと no-urban ケースの計算が実施されるため，シミュレーションは一つの都市に対して 12 か月分の倍である 24 回実施された．

4. 結果

(1) 各都市おける都市化前土地利用データベースの検証

構築した都市化前土地利用データの妥当性を評価する．**図-5** に構築した都市化前土地利用の Cairo（左図），Jakarta（中央図），Tokyo（右図）の結果を示した．**図-5** の上図は，それぞれ修正 MODIS データ，下図は都市化前土地利用データである．修正 MODIS データにおいて，赤で示されたグリッドは都市を表す．

まず Cairo の結果について考察する．Cairo を首都とするエジプトは，北は地中海，東は紅海に臨み，南北に世界最長の大河，ナイル川が貫流している．土地利用において特徴的なことは，ナイル川沿いの渓谷と河口のデルタ地帯を除けは砂漠が占めていることである．ナイル河谷では，ナイル川の雨季による洪水を利用し古くから耕作が行われていた[11]．そのため，Cairo が都市化する以前は砂漠ではなく Cropplands であったことが予想される．それを踏まえ構築された都市化前土地利用データを見ると，修正 MODIS データにおいて都市を示すグリッドを Croplands に置き換えた結果として表現できていることがわかった．

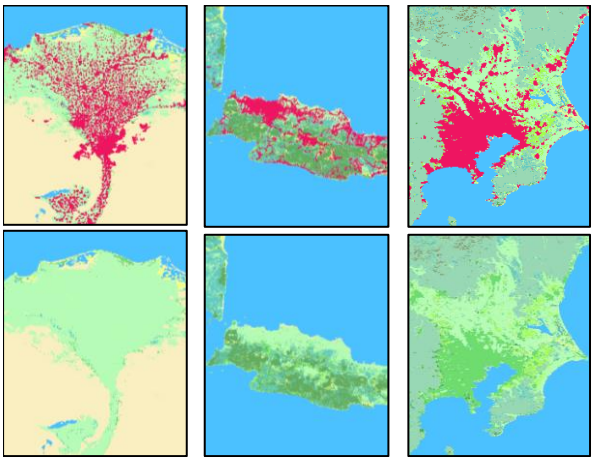

図-5 Cairo（右図），Jakarta（中央図），Tokyo（左図）における現在 MODIS データ（上図），都市化前土地利用データベースの空間分布（下図）土地利用の判例は**図-1** と対応する

次に Jakarta の結果を見る．Jakarta が位置するジャワ島は，オーストラリアプレートとユーラシアプレートの領界域にあり，インドネシア海溝に沿って東西に長い火山島を持つ．この火山の火口が巨大なカルデラを形成し，降水を効率的に取り入れることができる．このように貯蔵された降水は地下の水路を通り，広く平坦地に取水される．そのため，海抜の低いジャワ島北部は水田の造成基盤として古くから用いられてきた[12]．Jakarta の都市化前土地利用データをみると，低海抜に位置している都市は Croplands に置換されている．一方，南側の標高が高い位置では稲作に適さない．都市化前土地利用を見ると，南側の高い標高に位置している都市は Evergreen Broadleaf Forest に置換されており，地形背景を考慮した都市化前土地利用データが構築されたといえる．

最後に Tokyo の結果について考察する．Tokyo が位置する関東地方には，日本最大の平野である関東平野が広がっており，西部には大半を Mixed forests が占める関東山地がある．関東平野は，平野総面積の約 8 割を台地，丘陵が占め，江戸時代のそれらは平地林が分布していた．一方，関東平野の中でも，荒川，多摩川，利根川などの流域の低地は，江戸時代において水田，稲作が卓越していた[13]．構築された都市化前土地利用を見ると，関東平野の低地の土地利用は大半が Croplands に置換されていた．また，台地，丘陵に当たる位置は Open Shrublands に置換されており，都市化前の平地林を低木として見積もることができていた．

(2) 全球における都市化前土地利用データベースの検証

修正 MODIS データ，2003 年 MODIS データはともに衛星観測データであるため，グローバルを対象にした都市化前土地利用の推定が可能である．全球に対する各都市の詳しい検証は不可能であるが，簡易な検証は行っている．紙面の都合上全球の検証については割愛するが，修正 MODIS データにおける都市は，都市化前土地利用データベースにおいて**図-6** のように置換された．

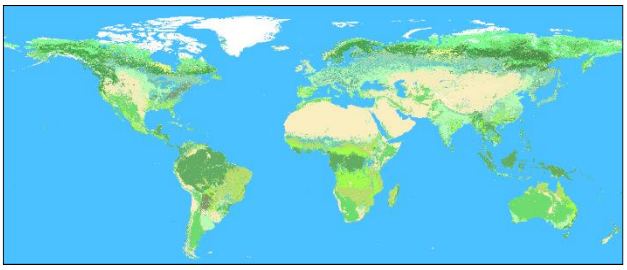

図-6 全球都市化前土地利用データベース

(3) 観測結果を用いたモデルの検証

モデルの妥当性を確認するために，観測結果と urban ケースのシミュレーション結果との比較を行う． 2006 年 1 月から 2015 年 12 月まで入手可能な毎月の統計を用いた．一つの都市に複数の観測地点が存在するため，合計 3422 地点の観測結果を分析した．**図-7** にて，シミュレーションと観測地における月毎の平均気温の傾向を比較する．観測とシミュレーションの地点は対応している．相関係数は 0.977 と，高い相関が得られており，本計算の妥当性が確認された．

(4) 都市温暖化の分析

urban ケースと no-urban ケースを比較し，得られた結果から都市温暖化の特徴を考察する．都市温暖化の昼夜の違いを考慮するにあたり，短波放射フラックスが正のときを日中，負の時を夜間と定義している．**図-8** は，各都市の解析対象領域内における一年間分の UHII の変化量を箱ひげ図で示したものである．**図-8** の横軸に示された都市は，右に行くにつれ高緯度に位置する．

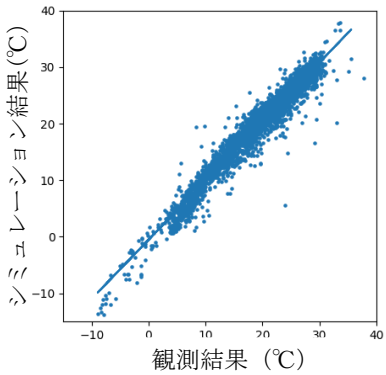

図-7 観測結果とシミュレーション結果の相関図

ほぼ全ての都市において，日中，夜間共に正の UHII を示し，都市温暖化の影響がみられた．各都市の年間 UHII の中央値について，都市間での平均±標準偏差は，日中は0.11±0.83（K），夜間は0.13±0.99（K）であった．標準偏差の差が示すように，夜間の UHII は，日中のものと比較すると都市ごとにばらつきが大きい．また日中と夜間の平均値を比較すると，夜間の方が UHII がやや強く表れている．urban ケースの夜間は日中に蓄えられた熱が夜間まで貯蔵され気温の低下が少なく，no-urban ケースの夜間は長波放射により気温低下が大きくなるため，気温差が大きくなり夜間 UHII が強くなったためである．

次に，特徴的な都市における UHII の影響について考察する．夜間における UHII の中央値が最も大きい Cairo に着目する． Cairo における都市化前土地利用は Croplands である．no-urban ケースでは，夜間の Croplands 周囲の砂漠の気温低下が発生し，陸風により Croplands 自体の気温が低下する．一方，urban ケースでは建物粗度による熱の貯蔵が発生し，夜間においても気温低下が少ない．そのため，気温差が大きくなっていることが反映された結果となった．

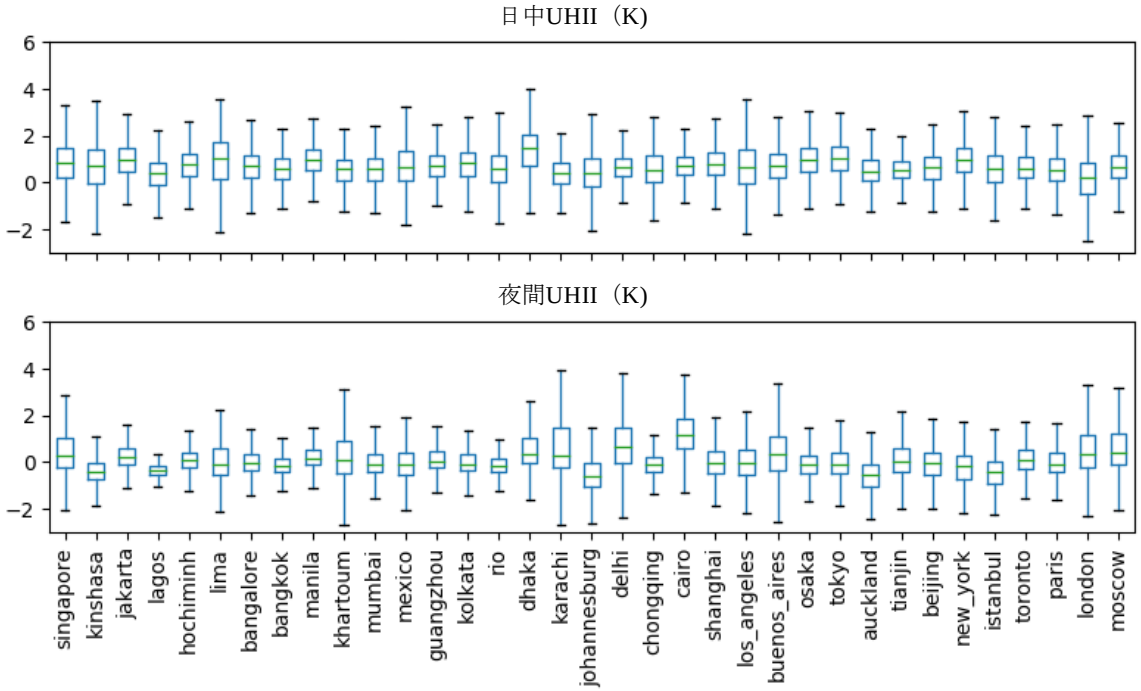

図-8 各大都市における UHII（緑線：中央値，ひげの上端：第三四分位数＋1.5×IQR より小さい最大値，ひげの下端：第一四分位数-1.5×IQR より大きい最小値，箱の上端：第三四分位線，箱の下端：第一四分位数）

5. まとめ

本論では，UHII を推定する際に必要となるグローバル都市化前土地利用データベースを構築した．現在の都市気象の計算結果と，構築した都市化前土地利用においての気象の計算結果を比較し，UHII を数値的に推定した．そして世界の大都市 35 か所を対象に都市温暖化の影響について考察した．

都市化前土地利用データベースの構築には，衛星観測データ MODIS の土地利用データを現在のものと，2003 年のものの二種類を用いた．作成されたデータを Cairo, Jakarta，Tokyo において検証した結果，地理的条件を考慮された都市化前土地利用データが構築されたことが確認できた．

都市温暖化の計算結果では，ほぼ全ての都市で日中，夜間ともに正の UHII を示し，都市温暖化の影響がみられた．これは立地条件，都市幾何などが重要な影響因子となりえることが確認された．

謝辞： 本研究は，文部科学省の科学研究費補助金基盤研究（A）（課題番号：17H01292）による支援を受けた．ここに謝意を表す．

参考文献

1) United Nations: 2018 Revision of World Urbanization Prospects, 2018.
2) Varquez, A.C.G.: グローバル都市気象学，水文・水資源学会誌 29.5，pp.313-352，2016
3) Arnfield, A. J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. Int. J. Climatol. 23, pp.1–26 , 2003.
4) 真壁拓也，仲良信人，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），70.4，I_331-I_336，2014.
5) 河野なつ美，董玥，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），72(4)，I_92-I_102，2016.
6) Dong, U,. A. C. G. Varquez, and M.Kanda.: Grobal anthropogenic heat flux database with high spatial resolution., Atomospheric Environment 150, pp.276-294, 2017
7) Varquez, A.C.G., and M.Kanda.: Global urban climatology: a meta-analysis of air temperature trends (1960–2009), npj Climate and Atmospheric Sciencevolume 1, Article number: 32, 2018.
8) Oke, T.R. Review of Boundary Layer Climates second edition 1978–1987.
9) Skamarock,W. C.,Klemp,J. B., Dudhia, J., Gill,D. O.,. … & Powers, J. G. (2018). Adescription of the advanced researvh WRF version 3, NCAR, Tech. Note, Mesoscale and Microscale Meteorology Division. National Venter for Atomospheric Research, Boulder, Colorado, USA
10) Varquez, A.C.G., N. Kawano, M.Kanda, and M. Nakayoshi.: Numerical Investigation of Anthropogenic Heat Emission Impacts on large Asian cities, 水工学論文集 Annual journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.63, I_1177-1182, 2018., 土木学会
11) Boulos L., Fahmy A. G.: Grasses in ancient Egypy, Kew Bulletin, Vol.62, pp.507-511, 2007.
12) I. Iwana.: Reformation of the Traditional Agriculture-Village in Java Based on Respect for Java's Primary Nature Condition,，岡山大学農学部学術報告，Vol.86, pp.87-101，1997.
13) 犬井正：関東平野の平地林の歴史と利用，森林科学，Vol.18，pp.15-20，1996.

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

CONSTRUCTION OF LAND USE DATABASE BEFORE URBANIZATION FOR GLOBAL URBAN CLIMATE ANALYSIS

Yuuri NARITA, Alvin C.G. VARQUEZ, Makoto NAKAYOSHI and Manabu KANDA

In order to analyze the effects of urban warming, it is essential to estimate Urban Heat Island (UHI) and elucidate its mechanism. However, the method to estimate UHI, which has been studied by previous numerical simulation, is simplified by replacing land use before urbanization with vegetation not necessarily representing the background climate of the region. This leads to inaccurate UHI estimates

In this study, we construct a land use global database representing pre-urbanization for an improved numerical modeling of the UHI. This database makes it possible to compare urban meteorological conditions using current land use and those utilizing typical land use before urbanization for any city around the world. This study demonstrates the usage of the global database by comparing two simulation cases for 35 large cities and examining the tendency of UHI. Temperature rises are seen in both cities during the daytime and nighttime in many cities. The current work also hints the possible dependence of UHI on topography, building geometry, etc.