

<報文>

数値気象モデルを用いた福岡都市域のヒートアイランド現象の解析*

松本 源生**

キーワード ①都市ヒートアイランド ②人工排熱 ③気象モデル

要 旨

福岡都市域では、猛暑日は8.9日/100年、熱帯夜日数は44日/100年の割合で増加し、地上気温の上昇率は地球温暖化に起因する気温上昇率を超えており、都市ヒートアイランドの影響が指摘されている。本研究では、都市キャノピーモデルを組み込んだ領域気象モデルWRFに入力する気象と土地利用データを変更し、推定式から導いた人工排熱データを用いて精度の高い数値気象モデルを構築した。再現実験の結果、都市ヒートアイランドに起因する気温上昇は風が停滞する夜間に大きく3℃から4℃に達したこと、日中は海風が卓越し内陸まで達するため、都市ヒートアイランドによる気温上昇は小さいことを明らかにした。更に、今後都市化が進展し、都市の集積度が高まればヒートアイランド強度もより大きくなることを示した。

1. はじめに

三大都市圏(首都圏, 中部圏, 近畿圏)では、人間活動による排熱(人工排熱)、緑地面積の減少による蒸発散の減少、都市ビルなどの熱容量の高い人工構造物の増加によって気温が上昇するヒートアイランド現象と呼ばれる都市気候が形成されている¹⁾。都市のヒートアイランド現象によって、熱帯夜による睡眠障害、熱中症などの健康影響や、エネルギー消費の増大、住宅等への空調設備増加が懸念される。

2009年の気象庁ヒートアイランド監視報告によれば、「三大都市圏に比べると九州北部では気温上昇も影響する面積も小さいが、夏季において晴れて風が弱い日に福岡市付近で2℃から3℃程度の都市化による気温上昇が見られた。」とあり、福岡都市域のヒートアイランド現象が確認されている。

本研究では、まず長期間の観測データから福岡都市域の気温上昇の実態を明らかにする。次に、数値気象モデルを導入し、夏季晴天時に焦点を当て都市気候の再現実験を実施する。用いた数値気象モデルは、米国大気研究センター(NCAR)と米国環境予測センター(NCEP)が中心となり開発され、実用的な天気予報と学術研究両方に対応した領域気象モデルWRF²⁾である。

2. 福岡都市域の気温上昇の実態

2.1 海面水温との比較

ヒートアイランド現象と同様、人間活動が原因で気温が上昇する地球温暖化は、大気中のCO₂、CH₄など温室効果ガスの増加に起因して気温が上昇する現象であり、地球規模な広がりを持つ。

気象庁では、都市化の影響が比較的小さいとみられる15地点と、三大都市圏の年平均気温を比較している。その結果、前者の気温上昇は日本近海で平均した海面水温(Sea Surface Temperature, 以後 SST と略記する。)の上昇と概ね等しく、地球温暖化による影響を反映しているのに対し、後者の気温上昇は日本近海で平均したSSTよりも明らかに高く、地球温暖化とともに都市化の影響がわっていると結論づけている³⁾。

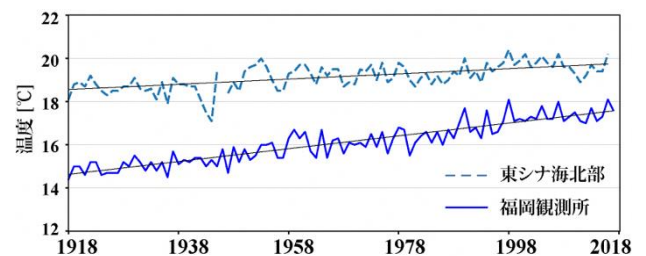


図1 100年間の温度変化(福岡観測所の地上気温と東シナ海北部SSTの年平均値)

*Numerical Estimation of The Heat Island Phenomenon in Urban Area of Fukuoka City and its Surrounding

**Gensei MATSUMOTO (福岡県保健環境研究所) Fukuoka Institute of Health and Environmental Sciences

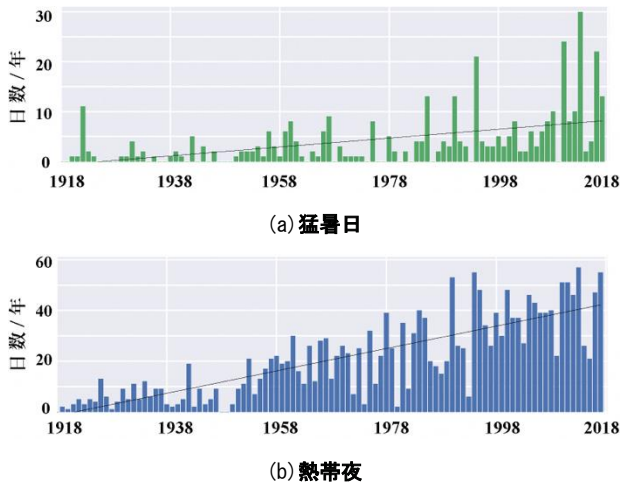


図2 福岡観測所における猛暑の長期変化

本研究においても、都市域の気温とSSTを比較した。図1に、気象庁地域気象観測システム(以後 アメダスと略記する。)の福岡観測所の年平均地上気温(地上1.5m)と、東シナ海北部の年平均SST⁴⁾について、100年間の長期変化を示す。共に緩やかに温度が上昇している。図には回帰直線も描いており、勾配は東シナ海北部SSTで1.2°C/100年に対して、福岡観測所の地上気温で2.9°C/100年であった。つまり、SSTよりも地上気温の上昇率が大きく、福岡都市域の気温上昇にヒートアイランド現象も一因していることが確認できた。

2.2 夏季の猛暑日・熱帯夜

福岡観測所のデータから、100年間にわたる猛暑の実態を図2に示す。最高気温が35°C以上となる猛暑日(図2(a))も、夕方から翌日の朝までの最低気温が25°C以上になる熱帯夜の日数(図2(b))も、ここ100年で増加している。両者とも回帰直線を描いており、勾配は猛暑日数で8.9日/100年であるのに対し、熱帯夜日数では44日/100年と5倍程度であり、最高気温よりも最低気温の上昇が顕著であることを示す結果となった。(なお、本研究では気象庁ヒートアイランド監視報告にならい、「夜間」を18時から翌6時、「日中」を9時から18時としている。)

3. 気象モデルの設定

解析対象期間は2016年8月で、Sugaら⁵⁾に従い降水量が5mm/日を超えず、4時間を超える降水が観測されなかった8月7日から8月27日の21日間とした。期間中、連日高気圧に覆われ晴天が続いていた。

本研究では気象モデルとして、WRF ARW Version 3.9.1.1を用いた。WRFを動かすには、気象、SST、土地被覆、地形の各種データ、また地表面パラメータ、更に力学・物理モデルを設定する必要がある。以下に、本研究で用いた設定について述べる。

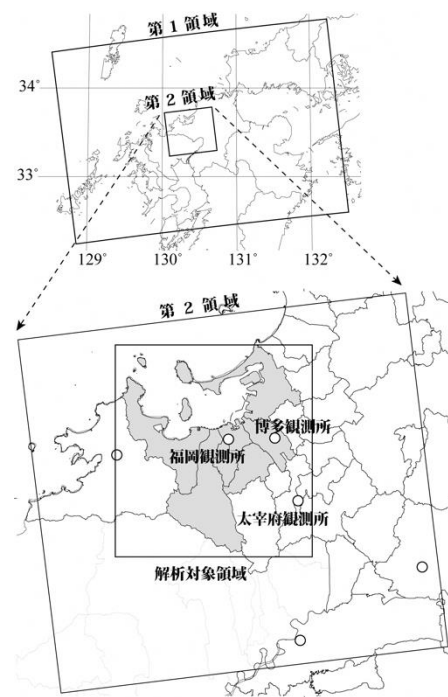


図3 計算領域と解析対象領域 (グレーの領域:福岡市, ○:アメダス観測所)

表1 各領域におけるグリッド情報

領域	格子数	格子サイズ	Time step
第1領域	70×50×40	5 km	30 秒
第2領域	61×56×40	1 km	6 秒

3.1 気象の初期値・境界値

気象データの初期値・境界値には、NCEPの最終全球客観解析データ(通称 FNL, 空間解像度1°, 時間解像度6時間)を利用することがデフォルトであるが、日本を対象とした詳細な計算を行うため気象庁のメソ再解析データ(Meso-Scale Analysis, 以後 MANALと略記する。)を利用した。MANALは水平格子間隔5km, 時間解像度はFNLの半分の3時間と優れているが、風速、大気の水湿度のみであり、不足するデータ(土壌水湿度など)はFNLで補った。

また、SSTは地上気温の再現性に影響を与える⁶⁾。WRFにデフォルトで用いられるNCEPが作成するRTG-SSTは単純なロジックの解析データであり、例えば福岡県に近い瀬戸内海の国東半島沖 北緯33°30'30", 東経131°30'30"地点の海域において水面温度が周囲より連日20°C以上低くなっているなど問題点が指摘されている。本研究では、日本近海での精度に問題のない英国気象局のOSTIA(Operational Sea Surface and Sea Ice Analysis)をSSTとして用いた。

3.2 計算領域とメッシュ分割

計算領域を図3に、各領域のグリッド情報を表1に示す。九州中部から山口県を覆う格子間隔5kmで70×50格子の領域(第1領域)を時間ステップ30秒で計算し、更に2方向

ネスティングで福岡県域を覆う格子間隔1kmで61×56格子の領域(第2領域)を時間ステップ6秒で計算した。鉛直方向の分割は、上空50hPa(高度約20km)までを40等分し、地表面近くが細かく上空に行くに従い粗くなる不等分割とした。最下点の格子点の高度は50mである。

解析対象領域は、図3下図に示した福岡市(グレーの塗り潰し)を含む経度130°01'58"から130°29'42", 緯度33°25'30"から33°52'28"の範囲に設定した。なお、本研究で用いる福岡都市域は、この解析対象領域を指している。

3.3 力学・物理モデル

圧縮性流体の静力学の運動量保存式、質量保存式、熱の保存式、水蒸気・雲水・雨水・雪・あられの保存式を基本方程式系として組み込んでいるWRF²⁾は、各種気象現象を解くスキームを多数持っている。スキームの種類ごとに複数の力学・物理モデルが装備されている。

本研究ではデフォルトでないスキームも多く選択しており、雲微物理スキームには6つの水物質の状態変化を計算するWSM6を、境界層スキームには2次方程式の渦粘性近似モデルであるMYNN Level-3を、地表面スキームにはモニン・オブコフの相似則を用いるMYNN surface layerを用いた。更に、陸面スキームには都市外に対して計算ステップ毎に土壌水分量を更新するNoah-LMSを用い、都市には都市キャノピーモデルとして都市の熱収支を再現するSingle-Layer Urban Canopy Model(以後 UCMと略記する)を用いた。

3.4 土地利用の設定

コンクリートや建造物などの人工被覆域は植生域と比べて、日射による熱の蓄積が大きく地表面から上方への熱の拡散が多くなるため、気温上昇が大きいの。また、建造物の高層化、高密度化が進むと、天空率の減少、風通しの悪化により気温の低下が妨げられる。このため都市域のヒートアイランド現象の計算に用いる土地利用データは、高精度に都市域を表現しているものが求められる。実際、土地利用データの違いが、特に猛暑時の計算に大きな影響を及ぼす⁶⁾との報告がある。

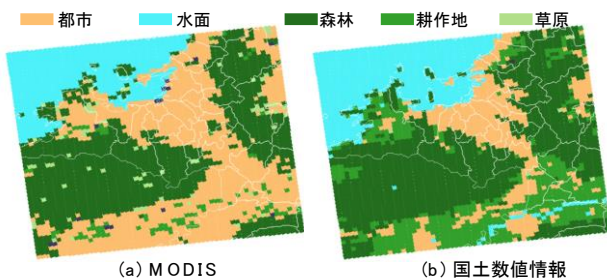


図4 土地利用データの比較

WRFはデフォルトで、NASAの衛星観測システムMODISに

よるデータを解像度30"に加工したもの(以後 MODISと略記する。)が土地利用データとして設定されるが、MODISは日本の土地利用を正確には反映していない。そこで、第1領域及び第2領域の土地利用を国土数値情報の土地利用3次メッシュデータ(解像度1km)に変更した。

メッシュには森林、草原、耕作地、都市、水面の面積の割合が記述されており、領域2の各メッシュについて最も面積の多い代表土地利用項目の分布図を図4に示す。MODISの土地利用(図4(a))は山間部を除く福岡市からの広い範囲が都市となっているなど現状を反映していないのに対し、国土数値情報(図4(b))は第2領域の南部の広範囲が水田であることを示しており、妥当な土地利用データであることが確認できた。

3.5 都市の細分類

WRFでUCMを使うため(Tewariら⁷⁾)には、都市の土地利用区分をLow-intensity residential, High-intensity residential, Industrial/Commercial zone(以後、それぞれLow, High, Commercialと略記する。)と3種類の都市形態に分ける必要がある。この概念を日本に適用するため、義江ら⁸⁾は数値地図5000の土地利用項目から3種類の都市形態を集約しているが、数値地図5000は三大都市圏にしか提供されていない。そのため、本研究では国土数値情報の用途地域データを用いることとし、表2に示すように、UCMの都市形態と用途地域の分類を対応させ、都市形態をも考慮した土地利用データを作成した。図5には、福岡都市域の都市形態の分類図を示す。

UCMの計算に重要なパラメータの一つである都市の割合(Fraction of urban, 以後 $Frac_{urb}$ と略記する。)は

$$Frac_{urb} = A_{Urban} / A_{Grid}$$

により計算する。ここで、 A_{Urban} はメッシュ内の都市の面積、 A_{Grid} はメッシュ面積である。都市形態ごとに $Frac_{urb}$ を集計した値を表3に示しているが、第2領域で78%から87%であり、用途地域に指定されているメッシュでは高い値を示した。表3には、UCM計算にとって重要な

表2 UCMの都市形態と用途地域の対応

区分	UCMの都市形態	国土数値情報
	内容	用途地域
Low	建造物 30-80%, 植生 20-70% 土地の殆どが一戸建て住宅	第一種低層住居専用地域
		第二種低層住居専用地域
High	建造物 80%以上, 植生 20%未満 建造物はアパート・長屋が主	第一種中高層住居専用地域
		第二種中高層住居専用地域
Commercial	商業地域・工場、道路・鉄道	第一種住居地域
		第二種住居地域
		準住居地域、近隣商業地域
		商業地域、準工業地域
		工業地域、工業専用地域

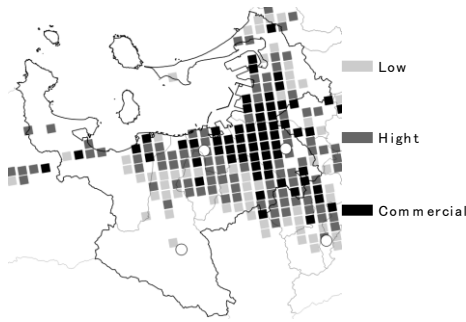


図5 福岡都市域の都市形態
(○:アメダス観測所)

表3 UCM計算の重要パラメータ

都市形態	建物高さ	建ぺい率	$Frac_{urb}$
Low	7.5	46	78
High	8.1	49	82
Commercial	8.2	50	87

建物高さ、建ぺい率(指定建ぺい率でなく、実際の敷地面積に対する建物面積の割合)も示しているが、これらの値はShresthaら⁹⁾が近畿圏の検討で用いた値を適用した。その他、UCMに必要な地表面パラメータ(粗度長、アルベド、蒸発効率、放射率)については、義江ら⁸⁾に示された首都圏の値を適用した。

3.6 人工排熱データ

エネルギーを消費することに伴い発生する人工排熱(Anthropogenic Heat, 以後 AHと略記する。)は、都市のヒートアイランドの原因の一つと考えられている。国内でAHを調査した例として、足永ら¹⁰⁾、Moriwakiら¹¹⁾の研究があり、首都圏では高解像度なAHデータが得られている。しかし、福岡都市域に関する同様なデータはない。本研究では、Sailorら¹²⁾が2015年に開発した手順を適用し、AHを求めた。

Sailorの手順は、合衆国内の各都市のAHを求めることを基本として、まず

$$Q_{fmax\cdot夏} = \beta_0 + (\text{人口密度}) \cdot \beta_2 \quad (\text{式-1})$$

でAHの日最大値 $Q_{fmax\cdot夏}$ を求める。ここで、 $\beta_0=2.554$ 、 $\beta_2=0.007$ で与えられる。これは米国にのみ適用される式であり、米国以外の都市に対しては、

$$Q_{fmax\cdot夏\cdot米国以外} = f_{ec} \cdot Q_{fmax\cdot夏} \quad (\text{式-2})$$

で変換することでAHの日最大値 $Q_{fmax\cdot夏\cdot米国以外}$ が得られる。ここで、 f_{ec} は国別に適用されるパラメータであり、日本の場合 $f_{ec}=0.51$ で与えられる。

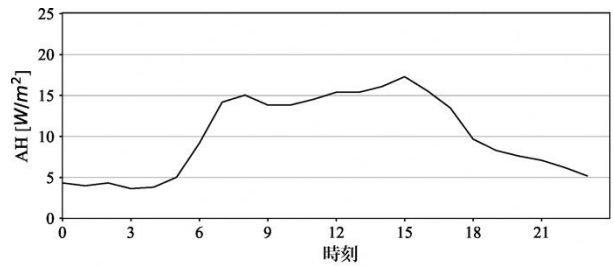


図6 計算に用いたAHの時間プロフィール

(式-1)、(式-2)に、2015年国勢調査による福岡市の人口密度4,480人/km²を代入すると、

$$Q_{fmax\cdot夏\cdot福岡} = 17.29 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

が得られ、このAHの日最大値にSailorが提案した時間重みパラメータを適用することにより、福岡市におけるAHの時間プロフィールが算出される。

算出したAHの時間プロフィールを、図6に示す。足永ら、Moriwakiらによる関東地方におけるAHの日最大値(新宿136W/m²、銀座86W/m²、東京23区平均34W/m²)や時間プロフィールと比較して、妥当な数値が得られたと判断し、本研究では図6の時間プロフィールを都市形態Low、High、Commercialに一様に与えた。

3.7 計算機環境

計算には、Intel Core i5 3.1GHz、メモリ8.0GBのPCを用いて4コア並列演算を行った。解析対象期間の前に2日間の計算安定期間を加えた計23日間におよぶ再現実験に、約43時間を要した。

4. 再現性の検討

WRF計算の再現性の検証のため、図3に示したアメダス観測所3地点について、観測値と計算値を比較した。

博多観測所における10分値の地上気温の変動を図7に示す。計算値は観測所直近の第2領域格子点での地上気温であり、解析対象期間21日間にわたって両者は近い推移をしているものの、日毎の最大値、最小値に違いが見られる。実際、表4にアメダス観測所3地点について観測値

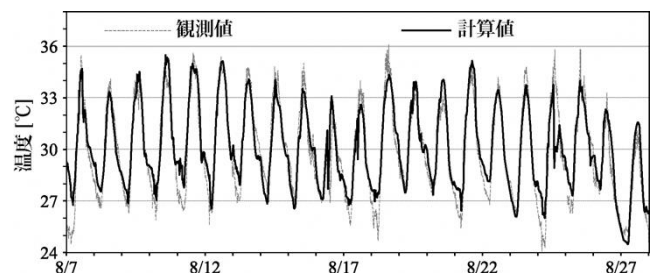


図7 博多観測所における地上気温の変動
(10分値、点線:観測値、実線:計算値)

表4 計算値の評価指標

観測所	相関係数	MAE (°C/10min)	RMSE (°C/10min)
福岡	0.84	0.87	1.48
博多	0.93	0.77	1.02
太宰府	0.90	1.24	1.55

表5 各ケースの設定

ケース名	土地利用
Base	現状
Run-WOOD	都市、耕作地を森林に変更
Run-URB100	Low, High, Commercial のメッシュについて、都市の割合を100%に変更

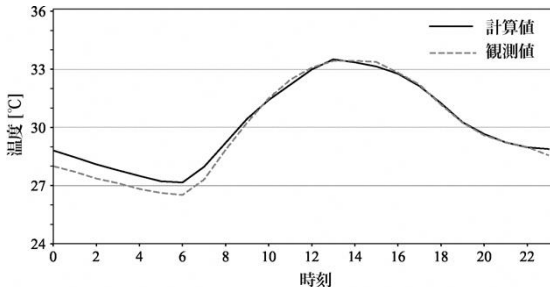


図8 博多観測所における地上気温の21日間平均日変化

と計算値の相関係数, MAE (平均絶対値誤差), RMSE (二乗平均平方根誤差), 更にMAEに対するRMSEの比を示しているが, 相関係数は3地点で0.82から0.91と良好な範囲にあるものの, 0に近いほど計算精度が高いことを示すMAEとRMSEは, それぞれ0.88から1.28, 1.21から1.50であり, 小さくない誤差が認められる。観測との差の原因として, 計算では下層の鉛直解像度が十分でなく夜間の接地境界層の再現が十分でないこと。また, 用途地域は規制のための基準であるため, 図5に示した都市形態分類は実際にはLowの都市形態のメッシュをHighに分類する可能性もあり, 都市化が進んだメッシュを実際より多めに見積もる傾向にあること。更には, 建物高さ建ぺい率は関西圏の再現実験のデータを引用しているおり, 実際よりも大きめの数値を適用した可能性などが挙げられる。

しかし, 日下ら²⁾によれば, 解析対象期間の期間平均値, 時刻別平均値など期間平均によれば気温の再現性は向上すると指摘されている。そこで, 本研究でも解析対象期間21日間の平均による比較のため, 図8に博多観測所における21日間の各時刻で平均化処理した地上気温の日変化を示す。夜間に高温バイアスが見られるが, 0.3°Cから0.8°Cと小さく, 日中は高い精度で一致している。これ以降, 解析対象期間の各時刻で平均処理したデータについて解析を進める。

5. 土地利用変化の影響評価

ここでは, 福岡都市域のヒートアイランド現象を検討するため, 表5示す各ケースについて数値実験を実施する。Baseは現状の土地利用, つまり前章にて再現性を検討したものの。Run-Woodは都市と耕作地を全て森林に変更した, 人間活動がない場合を想定したものの。Run-URB100は都市形態Low, High, Commercialの各メッシュについて都市の

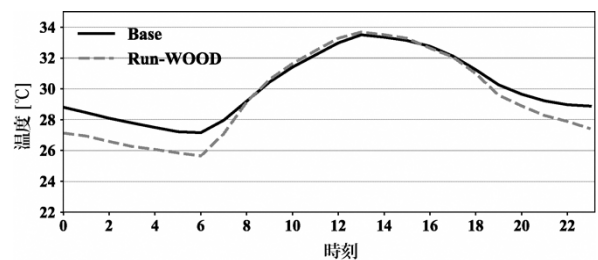
みとし, 現状78%から87%の $Frac_{urb}$ を100%に変更した都市化が更に進展した状況を想定したものである。

5.1 都市化の影響

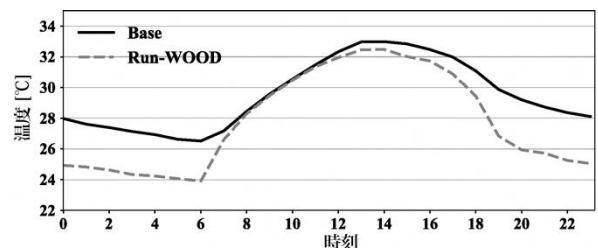
気象庁では, 都市化の影響を「都市あり実験」と「都市なし実験」の差として扱っている¹⁾。本研究では, Baseが「都市あり実験」, Run-WOODが「都市なし実験」に相当しており, 両者の差から都市化の影響を検討した。

図9に博多観測所および太宰府観測所の地上気温の日変化を示す。10時から16時の時間帯においては, 周囲が都市域である博多観測所でBaseとRun-WOODにほとんど差異はなく, 都市化の影響は認められないが, 周囲に水田, 森林が点在する太宰府観測所では都市化の影響による気温上昇が最大で0.69°Cあった。18時から6時の夜間においては, 都市化の影響が顕著に現れており博多観測所, 太宰府観測所でそれぞれ2°C前後, 3°C前後の都市の影響による気温上昇が継続した。

都市形態がHigh, Commercialのメッシュの中に位置する博多観測所よりも, 周辺に位置する太宰府観測所のほうが都市化の影響が大きかったが, この現象を詳細に解析するため, 図10に都市化の影響の分布図を示す。夜間の時間帯である早朝6時(図10(a))には福岡都市域の広い範囲で3°Cを超える気温上昇があり, その領域は図5で示



(a) 博多観測所



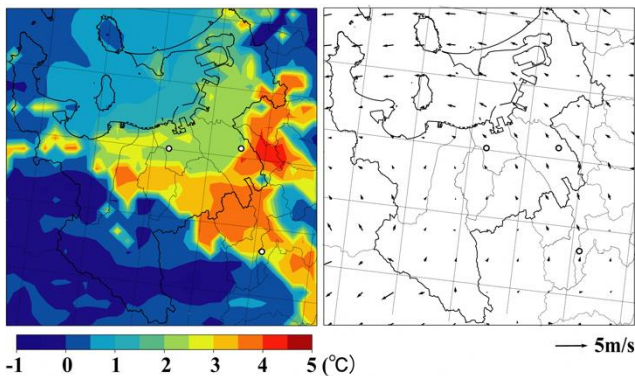
(b) 太宰府観測所

図9 21日間を平均した地上気温の日変化

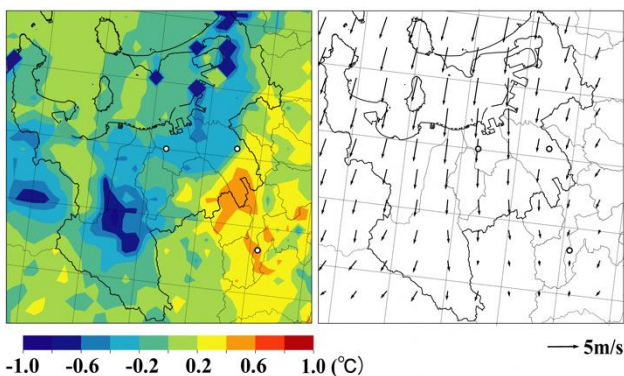
した都市形態の地域と概ね一致した。ただ、博多局から太宰府局にかけての地域は温度上昇が4℃近くあったが、都市形態Commercialは少なく、Highの多い地域であった。温度上昇が負値となった地域は山間部である。風系図と並べて見ると、気温上昇が大きい地域と陸風が弱風となる地域が概ね一致した。

日中の最高気温となった時間である13時(図10(b))には、福岡都市域で温度上昇が1℃を超えることはなく、日中には夜間ほどの顕著な都市化の影響がなかった。風系図によれば、海に近い地域では北向きの風で風速は5m/sを超えていることから、日中は強い海風が都市域の熱(熱気は上空へ移動し易い。)を内陸の森林地帯に輸送する役割を担った結果、都市化が進んでも温度上昇が小さく抑えられていると考えられる。実際、風速が1m/sから2m/s程度と弱い太宰府局近傍では0.8℃程度の気温上昇があり、周辺よりも都市化の影響が僅かに認められた。

夏季の晴天が継続した期間を対象に再現実験を行い、都市化の影響は夜間に強く、日中はほとんどなく、夜間は陸風が停滞するのに対し、日中は卓越する海風が内陸部にまで達していることを確認した。日下ら²⁾による首都圏の解析でも同様である傾向が報告され、既に都市化の影響の定量的な解析を実施している。本研究でも、夜間



(a) 6時



(b) 13時

図10 21日間を平均した都市化の影響(左図)、風系(右図)

都市化の影響が福岡都市域の広い地域で3℃から4℃に達することを、再現実験から導いた。

更に、図2において熱帯夜日数の増加が猛暑日の増加を上回ったことについても、都市化の影響は夜間に強く、日中はほとんどない計算結果と矛盾しない結果となった。

5.2 都市化の進展の影響予測

都市化が更に進展したケースを想定して、気温上昇を予測を試みた。ここでは、表5に示した現状の土地利用であるBaseと、都市形態のメッシュの都市の割合を100%に変更したRun-URB100の計算結果をもとに、ヒートアイランド強度¹³⁾(Urban Heat Island Intensity, 以後 UHIと略記する。)を導入して都市化の進展に対する気温上昇の評価を行った。

UHIはヒートアイランド現象の進行状況を示す気候学的指標であり、

$$UHI = T_{Urban} - T_{Rural}$$

により与えられる。ここで、 T_{Urban} 、 T_{Rural} はそれぞれ都市、郊外の代表温度である。本研究では、 T_{Urban} には都市、 T_{Rural} には水田、耕作地等を配慮して図11に示す3地点ずつをそれぞれの代表地点とした。



図11 UHI算出の代表地点

図12に、解析対象期間の各時刻で平均化処理したUHIの日変化を示す。日中は13時を除けば、Base、Run-URB100とも同様な値で推移していた。しかし、夜間の18時から顕著な差が現れ、Run-URB100のUHIがBaseに比べて0.5℃程度大きくなり、6時まで同程度の差が継続した。このことは、都市集積度が高くなることによって、夜間のUHIが0.5℃は大きくなる余地が十分にあることを示唆している。すなわち、都市形態のメッシュの都市の割合を100%に設定したRun-URB100は、表3に示した78%から87%の範囲の $Frac_{urb}$ を100%に変更したに過ぎず、建物高さや建ぺい率はBaseと同一値としており、Run-URB100よりも更に都市化の進んだケースも設定できる。

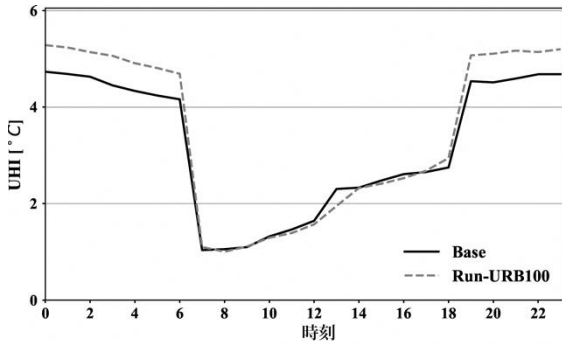


図12 21日間を平均したUHIの日変化

このように、都市域に建物を増せばヒートアイランド現象に起因する更なる温度上昇が生じる。温度上昇を抑制するためには、公園などの用途の土地を十分に確保することが必要と考える。

都市化の進展として、ここでは都市形態のメッシュの都市の割合を100%とした検討を実施した。建ぺい率の増加、森林や耕作地のメッシュを都市に変更することによる都市化の進展の解析も可能であるが、今回は都市形態のメッシュの都市の割合を増加する解析に留めた。

6. あとがき

気象モデルWRFにUCMを適用して、福岡都市域の夏季におけるヒートアイランド現象の再現実験を行った。計算に先立って、気象庁アメダス観測所の100年分のデータから地上気温、猛暑日、熱帯夜を抽出し、福岡都市域の気温上昇には地球温暖化だけでなくヒートアイランド現象も一因することを確認した。

気象モデルの再現精度を向上させるため、気象の初期値・境界値、土地利用データを変更し、人工排熱データを適用した。計算結果を観測値と比較し評価指標を算出したところ、小さくない誤差が認められたが、解析対象期間21日間の時刻別平均値による日変化は観測データを精度よく再現できた。

「都市あり実験(現状)」と「都市なし実験」の再現実験の比較から、都市化の影響による気温上昇は風が停滞する夜間に大きく都市域で3°Cから4°Cにおよび、日中は海風が強いため都市化の影響は小さいことを示した。都市化が進展するケースとして、都市が代表土地利用項目となっているメッシュについて、都市化の割合を増加させる数値実験から、都市の集積度が高くなればヒートアイランド強度も増加することを確認した。

今回の検討では、都市の細分類に国土数値情報の用途地域を用いたが、三大都市圏に提供される数値地図5000に相当する実態を反映した詳細なデータが望まれる。また、建物高さ、建ぺい率、地表面パラメータには首都圏や近畿圏の研究で用いられた数値を多々引用した。今後、

これらのデータが福岡都市域で整備されれば、ヒートアイランド現象の更に高精度な解明が期待できる。

7. 引用文献

- 1) 気象庁：ヒートアイランド監視報告2016, 2017
- 2) 日下博幸：領域気象モデルWRFについて, ながれ, 28, 2009
- 3) 気象庁：ヒートアイランド現象と地球温暖化は違うのですか?, <http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr-faq/03/qa.html>
- 4) 気象庁：海面水温の長期変化傾向(日本近海)のデータ, <http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/a-1/japan-warm/japan-warm-data.html>
- 5) Suga M., Almkvist E., Oda R., Kusaka H., Kanda M. : The impacts of anthropogenic energy and urban canopy model on urban atmosphere. *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, **53**, 283-288, 2009
- 6) Grossman-Clarke S., Zendr J.A. : Contribution of Land Use Changes to Near-Surface Air Temperatures during Recent Summer Extreme Heat Events in the Phoenix Metropolitan Area. *American Meteorological Society*, **53**, 1649-1664, 2010
- 7) Tewari M., Chen F., Kusaka H., Miao S. : Implementation and Evaluation of a Single-Layer Urban Canopy Model in WRF/Noah. The 7th WRF Users' Workshop, June 2006
- 8) 義江龍一郎, 三浦翔, 望月政法：風環境評価のための標準上空風データの整備に向けた領域気象モデルWRFの検証. 日本風工学会論文集, **40**, 113-122, 2015
- 9) Shrestha K.L., Kondo A., Maeda C., Kaga A., Inoue Y. : Investigating the Contribution of Urban Canopy Model and Anthropogenic Heat Emission to Urban Heat Island Effect using WRF Model. 日本冷凍空調学会論文集, **26**, 45-55, 2009
- 10) 足永靖信, 李海峰：顕熱潜熱の違いを考慮した東京23区における人工排熱の排出特性に関する研究. 空地調和・衛生工学会, **62**, 121-130, 2004
- 11) Moriwaki R., Kanda M., Seno H. : Anthropogenic water vapor emissions in Tokyo. *Water Resources Research*, **44**, 2008
- 12) Sailor D.J., Georgescu M., Milne J.M., Hart M.A. : Development of a national anthropogenic heating database with an extrapolation for international cities. *Atmospheric Environment*, **118**, 7-18, 2015
- 13) 榎原保志, 北原祐一：日本の諸都市における人口とヒートアイランド強度の関係. 日本気象学会, **304**, 41-49, 2003