広島平野における夏季の気温分布に関する研究

－夏季多点同時気温観測による気温分布形成要因の分析－

A STUDY ON SUMMER TEMPERATURE DISTRIBUTIONS IN HIROSHIMA PLAIN

Analysis on the causes of temperature distributions based on multi-point measurement in summer

松尾 薫*, 田中 貴宏**

Kaoru MATSUO and Takahiro TANAKA

Urban planning incorporating mitigation of the urban warming which is due to urban heat island phenomenon and global warming is needed. The mitigations that are thought to be suitable in each place should be selected, because the climatic characteristics are different by places in urban area. Accordingly, Urban Environmental Climate Maps (UECMs) are proposed as a tool for examining the suitable mitigation in each place. For making UECMs, at first, it is necessary to understand the summer temperature distribution patterns and factors of them in urban area. Therefore, this study aims at evaluating the relationship between temperature and the factors comprehensively using observed data in Hiroshima plain. As a result, in the daytime, distance from the coastal line in the direction of sea breeze and the rate of building blocking (RBB) in south-southwest direction have effects on the temperature distribution. In the nighttime, RBB in north-northeast direction and surrounding green area have effects.

Keywords: urban heat island, GIS, urban environmental climate map, temperature

都市ヒートアイランド, GIS, 都市環境気候図, 気温

1. はじめに

近年、わが国の多くの都市では、土地被覆の変化や人工排熱の増加等により、都市ヒートアイランド現象が生じている¹⁾。この都市ヒートアイランド現象、および地球温暖化による都市高温化が、夏季の屋外空間の快適性を低下させるとともに、空調用エネルギー消費の増大、都市生態系の変化、熱中症等の健康被害など、様々な影響を引き起こすと言われており、その緩和が望まれている²⁾。

この都市高温化の対策は、同一都市内においても場所により適した対策が異なるため、それぞれの場所に応じた対策を実施する必要がある。そこで、都市内の各場所に適した都市高温化対策を検討するための資料として都市環境気候図（クリマアトラス）が提案されている³⁾。この都市環境気候図作成のためには、まず夏季の都市内気温分布の形成要因を把握する必要があると考えられる。

このような気温分布形成要因の把握を目的とした気温観測はこれまでも行われてきた。例えば竹林ら⁴⁾は、大阪市を対象として気温観測を行い、その結果と風観測データ（大気汚染常時監視局での観測データ）を利用し、夏季昼間の気温は海風、夜間の気温は周辺土地利用の影響をそれぞれ受けることを明らかにしている。また、十二村ら⁵⁾は、仙台市を対象に気温観測を行い、その結果と風観測データ（仙台市環境局による観測データ）をもとに、広域気温分布

と緑被率との関連、海風による都市気温緩和効果の空間分布等を示している。石田ら⁷⁾は、中山間地域に位置する郡上市において、気候観測（気温、湿度、風向・風速、日射量、地表面温度）を実施し、それらの結果を用いて、地形による日照時間の違いが気温分布に影響を与えること等を明らかにしている。しかし、都市環境気候図作成のためには、各種気温分布形成要因の影響の総合的評価^{注1)}を行う必要があると考えられる。

このような総合的評価を意図した既往研究として、例えば平野ら⁸⁾は、重回帰分析を用いて、各種形成要因（緑被率、人工被覆率、海岸線からの距離等）が関東平野南部の気温分布に与える影響の分析を行っている。これは関東平野南部というスケールでの分析であるが、都市環境気候図作成のためには、都市スケールを対象とした分析も必要と考えられる。都市スケールを対象としたものとしては、武市⁹⁾が、高知市を対象に気温観測（移動観測）を実施し、市街地中心部とそれ以外の地域では、形成要因が異なることを明らかにしている。しかし、これは夜間気温が対象であり、都市高温化対策を検討するためには、昼夜の形成要因をそれぞれ把握する必要があると考えられる。

以上のような背景から、本研究では広島平野を対象に、夏季多点同時気温観測を行い、その結果をもとに夏季の都市内気温分布の把

* 広島大学大学院工学研究科 博士後期課程・修士(工学)
日本学術振興会特別研究員 (DC2)

** 広島大学大学院工学研究科 准教授・博士(工学)

Grad. Stud., Graduate School of Engineering, Hiroshima Univ.
Research Fellow of Japan Society for the Promotion of Science
Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Hiroshima Univ., Dr. Eng.

1	井口明神小学校	9	深川小学校	17	中山小学校	25	川内小学校	33	広瀬小学校
2	観音小学校	10	矢野小学校	18	緑井小学校	26	荒神町小学校	34	中島小学校
3	五日市南小学校	11	青崎小学校	19	東野小学校	27	楠那小学校	35	吉島東小学校
4	八幡小学校	12	仁保小学校	20	船越小学校	28	安小学校	36	白島小学校
5	草津小学校	13	祇園小学校	21	袋町小学校	29	尾長小学校	37	吉島小学校
6	可部南小学校	14	戸坂小学校	22	梅林小学校	30	皆実小学校	38	中筋小学校
7	落合東小学校	15	大州小学校	23	口田東小学校	31	南観音小学校	39	長束小学校
8	長東西小学校	16	宇品東小学校	24	原南小学校	32	翠町小学校		

図1 広島市の位置と気温観測点

握、およびその形成要因の総合的評価を行うことを目的とした。広島においては、これまでに気象学分野、建築学分野等において気候環境の調査・研究が行われてきた。気象学分野では、例えば宮田¹⁰⁾が広島県の実地観測を明らかにしている。一方、建築学分野では清田ら¹¹⁾が、広島市を含む広域圏を対象に、気温・風観測データ（大気汚染常時監視局や気象台等での観測データ）を利用し、都市内気温と海陸風との関連を示している。また、同じく清田ら¹²⁾は、広島市内の都市部を対象に、気温観測（移動実測）を行い、気温と土地被覆等や海岸からの距離との関連を総合的に分析している。しかし、夏季多点同時気温観測の結果を用いて、気温分布形成要因の総合的評価を行った事例はほとんど見られない。

2. 研究概要

2-1. 対象地の概要

本研究は広島平野を対象とした（図1）。地形的特徴としては、太田川によるデルタ地形を有しており、平野を取り囲むように東部・西部・北部には丘陵地が広がる。また、南は瀬戸内海に接しており、既往研究¹⁰⁾でも海陸風循環が観測されている。特に、この地域は、南に四国山脈、北に中国山地があるため、季節風などの一般風が比較的弱く、海陸風がよく発達する地域であるとされている¹⁰⁾。

表1 パターン分類方法とその結果

	条件*	該当する日
パターンA 海風が見られない日 (2日)	・13時～16時の間に海寄りの風がない。 ・3時～6時と翌0時～3時に陸寄りの風がある。	9月5日、9月17日
パターンB 海風が吹くが 陸風は吹かない日 (4日)	・13時～16時の間に海寄りの風がある。 ・3時～6時と翌0時～3時に陸寄りの風がない。	7月24日、7月25日、7月31日、8月9日
パターンC 海陸風循環が見られる日 (29日)	・13時～16時の間に海寄りの風がある。 ・3時～6時と翌0時～3時に陸寄りの風がある。	7月20日、7月21日、7月22日、7月26日、 8月6日、8月7日、8月8日、8月10日、 8月11日、8月12日、8月13日、8月14日、 8月15日、8月16日、8月17日、8月18日、 8月19日、8月20日、8月21日、8月27日、 8月28日、9月10日、9月13日、9月14日、 9月19日、9月20日、9月21日、9月22日、 9月23日
* 4時間のデータのうち3時間以上各パターンの条件を満たすものを各パターンに分類することとする。

図2 晴天日の風配図（広島地方気象台）

2-2. 気温観測の概要

広島市内の小学校39地点（図1）の百葉箱に、データロガー付き温度センサー^{注2)}を設置し、気温の多点同時観測（2013年7月20日～9月23日）を行った。なお、測定間隔は20分とした。

2-3. 研究の流れ

本研究は以下の手順で進めた。次章以降で、これらの方法と結果について記す。

- 1) 典型的夏季晴天日の抽出
- 2) 気温と各気温分布形成要因（海風方向海岸距離、周辺風通し、周辺緑量、周辺河川面積）との関連分析
- 3) 重回帰分析による気温分布形成要因の総合的評価

3. 典型的夏季晴天日の抽出

3-1. 晴天日の抽出

広島地方気象台の気象観測データを用いて、晴天日の抽出を行った。なお、抽出の条件は以下の4つとした^{注3)}。

- ・ 1日の降水量が1mm以内。
- ・ 日照時間が可照時間の40%以上。
- ・ 日最高気温が30℃以上。
- ・ 天気が雨ではない。

これらの条件より、夏季多点同時気温観測期間中の全66日（2013年7月20日～9月23日）のデータから、晴天日として35日が抽出された。

3-2. 晴天日の日風況パターン分類

まず、文献10で提案された手法を参考に、表1に示す分類条件を作成した。次に、この条件を晴天日35日分の風向データ（広島地方気象台、毎正時）に適用し、一日の風の吹き方（風向の時間変化）による日風況パターン分類を行った。また、表1中の「海寄りの風」、「陸寄りの風」については、文献11の定義に従い、卓越風向を中心

図3 典型的夏季晴天日の気温分布（全29日平均）

とした180°未満の範囲から吹く風とした。具体的には、図2に示す晴天日35日間の風配図（広島地方気象台）より、「海寄りの風」は「海側の卓越風向（南西）を中心とした180°未満の範囲から吹く風」、「陸寄りの風」は「陸側の卓越風向（北北東）を中心とした180°未満の範囲から吹く風」とそれぞれ定義した。なおこの定義に従うと、例えば西や西北西からの風も「海寄りの風」に該当し、対象地の地理的要素から受ける感覚と若干異なる印象を受けるが、対象地の海陸風方向が海岸線に対して直交していないこと、また、西や西北西からの風の頻度自体が少ないことから、文献11の定義をそのまま使用することとした。その結果、晴天日35日分のデータが表1に示すとおり分類された。この結果より、晴天日ではパターンC（海陸風循環が見られる日）が際立って多いことがわかる。そこで以降の分析では、パターンCに分類された29日を典型的夏季晴天日として分析対象とすることとした。なお、2009年～2012年についても同様の分類を行った結果、この傾向は、いずれの年においても共通であった。

3-3. 典型的夏季晴天日における気温分布

海陸風循環が見られる典型的夏季晴天日（全29日）の平均日最高気温、平均日最低気温を図3に示す。昼間は沿岸部の気温が相対的に低く、一方、夜間は内陸部の気温が相対的に低い。これらの結果より、広島平野内部でも、場所により気温の日変化パターンが異なるものと推察される。そこで次章以降では、気温と各気温分布形成要因との関連分析を行うこととした。

図4 ベクトル平均風向（地上10m）

（メッシュは、WRFの計算メッシュ（1kmメッシュ）より平野部のみを抽出したもの）

表2 計算条件

計算期間	2013年8月4日～2013年8月17日
鉛直格子	28層（地表～100hPa）
水平格子	Domain1:3km(120×120格子)、Domain2:1km(103×103格子)
気象データ	気象庁メソ観解析値(3時間間隔、10km格子、20層) NCEP再解析全球客観解析データ(6時間間隔、1°格子、17層)
土地データ	標高データ 国土数値情報(空間解像度約250m) 国土数値情報(空間解像度約100m) 国土数値情報都市地域土地利用細分メッシュデータ(空間解像度100m)
	土地利用データ 広島市の都市計画基礎調査の建物用途データ Arc GIS データコレクション(ESRI ジャパン(株))の建物データ 環境省の現存植生図
雲物理過程	Purdue Lin scheme
放射過程	長波 Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) Longwave
	短波 MM5(Dudhia) Shortwave
大気境界層過程	Mellor-Yamada-Janjic PBL
地表面過程	都市域 Urban Canopy Model (UCM)
積雲パラメタリゼーション	非都市域 Noah LSM
4次元同化	なし

表3 計算値と観測値の比較（風速）

観測点	Bias (m/s)	RMSE (m/s)	Correlation
大気汚染 常時監視測定所			
井口小学校	-0.12	0.66	0.86
安佐南区役所	0.53	1.19	0.54
可部小学校	0.40	1.11	0.51
広島地方気象台	1.33	1.82	0.34

図5 計算値と観測値の比較（風向）

図6 気温と海風方向海岸距離との相関係数の時間変動

図7 気温と海風方向海岸距離との関係（14時）

図8 建物遮蔽率の概念図

4. 気温と各気温分布形成要因との関連分析

気温分布形成要因については、既往研究¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾を参考に、①海風方向海岸距離、②周辺風通し、③周辺緑量、④周辺河川面積の4つを対象とすることとし、これらと典型的夏季晴天日の時刻別平均気温との関連分析を行った。なお、①②③は沿岸都市において気温分布に影響を与えていると考えられる要因、④はデルタ地形特有の要因として位置づけ選択した。

4-1. 気温と海風方向海岸距離との関連分析

平野部全域の風分布を把握するために、メソ気象モデル WRF を

用い、典型的夏季晴天日が続く2013年8月4日～8月17日の数値計算を行い、その結果（助走期間を除く8月10日～8月16日）から海風が吹く時間帯（10時～20時）^{注4)}における平野部^{注5)}のベクトル平均風向・風速（地上10m）を算出した結果を図4に示す。なお、WRFによる数値計算の概要を表2に、観測データ（大気汚染常時監視局、広島地方気象台）との比較による精度検証結果を表3、図5にそれぞれ示す。表3、図5より計算結果と観測データとの差は概ね小さいと判断した。図4より、平野部では南南西方向の風が卓越していることが分かる。また、図5の大気汚染常時監視局（井口小学校、安佐南区役所、可部小学校）の観測値を見ても南南西方向の風が卓越している。一方、広島地方気象台の観測値を見ると南西方向の風が卓越しているが、これらの結果を総合的に考慮し、平野部全体の卓越風向を南南西と考えた。そこで、各観測点から南南西方向に直線を引き、海岸線と交わる点までの距離を「海風方向海岸距離」とした。この海風方向海岸距離と時刻別平均気温（観測データ）との相関係数の推移を図6に、正の相関係数が最大となる時刻（14時）の気温と海風方向海岸距離の関係を図7にそれぞれ示す。海風が吹く昼間の相関係数が正となっており、また14時は沿岸部と海風方向海岸距離約20kmの地点との間に3℃程度の気温差が見られ、これらは海風の影響と推察される。一方、夜間は、相関係数が負となっており、これは海水温の影響と推察される。

4-2. 気温と周辺風通しとの関連分析

前節では広域の海風の影響の分析を行ったが、観測点周辺の建物等による風通し環境も、その場所の気温に影響を与えているものと考えられる。そこで、ここでは「建物遮蔽率¹³⁾」という指標を用い、これと気温との関連分析を行うこととした。なお建物遮蔽率とは、気温観測点が特定の方向に対して、どの程度建物に遮られているか、その程度を表す指標である。建物遮蔽率の概念図を図8に、算出方法を以下にそれぞれ記す。

- 1) 「高さ」属性付きの建物データ^{注6)}（ポリゴン）と、観測点データ（ポイント）を準備し、建物データを「高さ」で立ち上げ、観測点データを高さ1.5mに配置する。（図8a）
- 2) 観測点から、半径r[m]のバッファポリゴンを作成し、これを高さh[m]で立ち上げる。（図8a）
- 3) 1)で立ち上げた建物データを用いて、観測点からの見通しライン（スカイライン）を作成する。その後、立ち上げたバッファポリゴンに含まれ、かつスカイラインの下側に入る領域を立体化する（スカイラインバリアの作成）。（図8a、b）
- 4) スカイラインバリアを地上に投影したエリアを作成する（スカイラインバリア投影面積の算出）。（図8c）
- 5) 観測点からのバッファポリゴンの特定方位部分（特定方位を中心とした90度部分）を抽出し、扇形ポリゴンを作成する。その後、スカイラインバリアの投影エリアを、この扇形ポリゴンで切り取る。（図8d）
- 6) 以下の式より建物遮蔽率を計算する。
（特定方位を南とした場合）

$$A_{\text{南}} = (X - Y) / X \times 100 \quad \cdots (1)$$

$A_{\text{南}}$: 建物遮蔽率（%）、 X : 扇形ポリゴンの面積（ m^2 ）、

Y : 南方向のスカイラインバリアの投影面積（ m^2 ）

建物遮蔽率は、全方位、および4方位（北北東・東南東・南南西・

図9 気温と建物遮蔽率との相関係数の時間変動 (r:半径、h:高さ)

図10 気温と建物遮蔽率との関係
(上:南南西 (11時)、下:北北東 (23時))

西北西)について算出した。さらに、方位別に半径 $r=50, 75, 100\text{m}$ と高さ $h=5, 10, 20\text{m}$ の組み合わせで合計 9 パターン^{注7)}の建物遮蔽率を算出し、それらの建物遮蔽率と時刻別平均気温との相関係数の時間変動を算出した。その結果を図9に示す。この図より、まず昼間については、南南西方向の半径 $r=100\text{m}$ 、高さ $h=5\text{m}$ の組み合わせで算出した建物遮蔽率と時刻別平均気温との間に高い正の相関が見られる。一方、夜間は北北東方向の半径 $r=100\text{m}$ 、高さ $h=20\text{m}$ の組み合わせとの正の相関が比較的高い。なお、正の相関係数が最大となる11時の気温と南南西 ($r=100\text{m}$ 、 $h=5\text{m}$) の建物遮蔽率との関係、および23時の気温と北北東 ($r=100\text{m}$ 、 $h=20\text{m}$) の建物遮蔽率の関係を図10に示す。これらの結果より、昼間は南南西側の建物遮蔽率、夜間は北北東側の建物遮蔽率が高いほど、気温が高くなる傾向にあることがわかる。これは、昼間は南南西方向からの海風、夜間は北北東方向からの陸風が吹いているためと考えられる。また既往研究¹⁵⁾でも指摘されているように、夜間の陸風は海風と比較し風速や厚さが小さく、高層建物の吹きおろし等の影響が小さいため、夜間は高い建物による遮蔽も観測点周辺の高温化に寄与し、その結果、気温と相関がみられる建物遮蔽率の h が昼夜で異なったものと推察される。なお文献16では、盆地都市を対象に気温と建物遮蔽率との関連分析がなされているが、そこでは昼夜ともに $r=100$ 、 $h=5$ の組み合わせが気温と最も相関が高いとされている。昼間について

図 1 1 気温と NDVI 平均値との相関係数の時間変動

図 1 2 気温と NDVI 平均値との関係（6 時）

図 1 3 気温と周辺河川面積との相関係数の時間変動

図 1 4 気温と周辺河川面積との関係（6 時）

は、本研究の結果と同様であるが、夜間については本研究の結果と異なる。この要因として、盆地都市特有の夜間冷気流の影響等が考えられるが、夜間の風通し指標としての建物遮蔽率における適当な r と h の組み合わせの追及については、今後の検討課題としたい。

以上の考察をふまえて、本研究では周辺風通しの指標として、最も気温との相関が高い r と h の組み合わせを採用することとし、昼間については南南西方向 ($r=100$, $h=5$)、夜間については北北東方向 ($r=100$, $h=20$) の建物遮蔽率をそれぞれ用いることとした。

4-3. 気温と周辺緑量との関連分析

ここでは、ASTER-VNIR による衛星画像（2012 年 4 月 27 日撮影^{注 8)}）から作成した NDVI（正規化植生指標）データ^{注 9)}を用いて、気温と緑との関連分析を行った。NDVI とは、植生の有無・多少・活性度を示す植生指標であり、緑被率と相関することが知られている¹⁷⁾。なお、ここでは、例えば土地被覆分類データを用いて緑被率を算出することも考えられるが、土地被覆分類を行う場合、緑以外のカテゴリーに分類されたピクセル内の緑量が評価できないため、本研究では NDVI を指標として用いることとした。

既往研究¹⁶⁾¹⁸⁾において、周辺 NDVI 平均値（NDVI 平均値）が気温に影響する範囲は、周辺半径 300m 程度であると示されているため、ここでは、周辺緑量の指標として半径 300m 圏内の NDVI 平均値を用いることとした。

時刻別平均気温と半径 300m 圏内の NDVI 平均値との相関係数の時間変動を図 11 に、負の相関係数（絶対値）が最大となる時刻（6 時）の気温と NDVI 平均値の関係を図 12 にそれぞれ示す。9 時～19 時は気温と NDVI 平均値との相関は低く、それ以外の時間帯では、比較的高い負の相関が見られる。これより、昼間は NDVI 平均値と気温との関連は小さいが、夜間は NDVI 平均値が高いほど、気温が低くなる傾向があることがわかる。なお、これは夜間の風速が相対的に小さく、周辺緑量による気温低下効果があらわれたためと考えられ、この傾向は、既往研究¹⁶⁾¹⁸⁾の成果と同様である。

4-4. 気温と周辺河川面積との関連分析

ここでは、対象地の水域データ^{注 6)}より作成した観測点の周辺河川面積を用いて、気温と河川との関連分析を行った。既往研究¹⁹⁾において、周辺の土地被覆特性が気温に影響する範囲は、周辺半径 300m ～400m 程度であると示されていること、また前節では周辺緑量の計算範囲を半径 300m 圏内としたことから、ここでは、周辺河川面積の指標として半径 300m 圏内の河川面積を用いることとした。次に、時刻別平均気温と半径 300m 圏内の周辺河川面積の関係を図 13 に、相関係数が最大となる時刻（6 時）の気温と周辺河川面積の関係を図 14 にそれぞれ示す。

全体的に相関係数は低い、夜間は正の相関、昼間は負の相関がやや見られる。これより、夜間は周辺河川面積が大きいほど、気温が高くなる傾向、昼間は低くなる傾向がややあると考えられる。しかし、他の気温分布形成要因に比べると、相関は低い。本研究の気温観測点群は、広島平野内の気温分布を把握することを意図して設定したものであり、文献 12 で指摘されているような河川が周辺に及ぼすローカルなスケールの影響を把握するための空間密度を有していないものと考えられる^{注 10)}。都市環境気候図作成という観点からは、このようなスケールの気温分布把握も必要と考えられ、この点は今後の課題としたい。

表 4 説明変数間の相関係数

	海風方向 海岸距離	遮蔽率 (南南西)	遮蔽率 (北北東)	周辺NDVI 平均値	周辺河川 面積
海風方向海岸距離	1.00	0.46	-0.24	0.57	-0.22
建物遮蔽率(南南西)	-0.46	1.00	-0.11	0.43	-0.40
建物遮蔽率(北北東)	-0.24	-0.11	1.00	-0.20	-0.00
周辺NDVI平均値	0.57	0.43	-0.20	1.00	-0.32
周辺河川面積	-0.22	-0.40	-0.00	-0.32	1.00

図 15 時刻別標準化偏回帰係数と重相関係数

図 16 典型的夏季晴天日の風向度数分布

横軸のアンダーバーの前の値は観測点からの周辺半径、後ろの値は注10の①～③の分類を示す。例えば「100m_①」は周辺半径100m圏内に河川がない観測点群を示す。なお、「100m_③」については、該当する観測点が1つのみなので、標準偏差を表示していない。

図 17 海陸風循環が見られる日における 10 時～20 時の平均気温 (河川との位置関係による分類)

5. 重回帰分析による気温分布形成要因の総合的評価

4 章では気温と各気温分布形成要因との間の相関係数の比較を通して、気温と各要因との関連分析を行った¹¹⁾。本章では、これらの要因の影響度合いを総合的に評価するために、重回帰分析を行った。具体的には、4 章で扱った海風方向海岸距離、南南西方向の建物遮蔽率、北北東方向の建物遮蔽率、周辺 NDVI 平均値、周辺河川面積の 5 つを説明変数、典型的夏季晴天日の時刻別平均気温を目的変数とし、時刻別に重回帰分析を行った。なお説明変数間の相関係数は表 4 に示すとおりである。時刻別の標準化偏回帰係数、および重回帰係数を図 15 に示す。

まず 0 時～7 時 (主に夜間) および 12 時～18 時 (昼間午後) における重回帰係数が 0.8 程度と高いことから、これらの時間帯における気温分布に対して、ここで作成した重回帰式は決定係数 0.6 以上の説明力を有していると言える。次に、標準化偏回帰係数については、昼間は、海風方向海岸距離が正の方向に大きく、南南西側の建物遮蔽率も正の方向にやや大きい。このことから、夏季昼間の気温は南南西方向からの風 (海風) の影響により低下しており、さらに周辺風通し環境の影響も受けているものと推察される。また夜間は、北北東側の建物遮蔽率の標準化偏回帰係数が正の方向に、NDVI 平均値が負の方向に大きいことが確認できる。このことから夜間は周辺緑量、北北東からの風により気温が低下しているものと推察される。なお、朝の 8 時～9 時は、海岸距離の標準化偏回帰係数が負の方向に大きいものの、重回帰係数が相対的に低い。このことから、この時間帯の気温には、今回取り上げたもの以外の要因 (例えば、日当たり等) との関連があると考えられる。

6. おわりに

本研究ではデルタ地形を有する広島平野を対象に、夏季多点同時気温観測を行い、夏季の都市内気温分布の把握、およびその形成要因との関連分析を行った。さらに、それらの形成要因の影響度合いを総合的に評価するために重回帰分析を行った。

その結果、昼間の気温に関しては、海風方向海岸距離の影響が大きく、さらに南南西側の風通し環境の影響も受けていること、また夜間気温は、周辺緑量、北北東側の風通し環境の影響を受けているという知見を得た。なお、関東平野を対象とした文献 8 では、夏季の昼間の気温分布には相模湾からの海岸距離の対数の影響が大きいことが示されているが、一方で海岸距離そのものの影響はあまり見られないとされている。この傾向は本研究で得られた傾向とは異なるが、これは関東平野と広島平野の広さの差に起因するものと考えられる。また、文献 16 では夜間の気温に対して NDVI 等の影響が大きいこと、また比較的影響度合いは小さいものの、昼夜ともに建物遮蔽率の影響も見られるとされており、この傾向は本研究の結果と同様である。ただし、気温との相関が高い建物遮蔽率の方位は異なっており、これは広島平野の風の吹き方の特徴が反映されているためと考えられる。

最後に、今後の課題を以下に記す。

- 1) 朝の 8 時～9 時の気温は、今回取り上げた気温分布形成要因とは別の要因 (日当たり等) が影響していると考えられるため、それらの要因と気温との関連を、3D-GIS 分析手法等を用いて明らかにする必要がある。

- 2) 平野部だけではなく、山間部についても同様の分析を行う必要がある。
- 3) 1)、2)の結果をもとに、気候分布形成要因による地域類型区分を行い、類型ごとの都市高温化対策の検討を行う必要がある。また、これらの成果をもとに最終的には都市環境気候図の作成につなげたい。

謝辞

本研究は JSPS 科研費（25420608）の助成を受けたものである。また、本研究を進めるにあたり、広島市環境局環境政策課、都市整備局都市計画課の方々にご協力をいただいた。さらに気温観測に際しては、広島市教育委員会、および広島市内の小学校の方々にご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

注

- 注1) 本論文では、重回帰分析等の多変量解析手法を用いて、気温に対する複数の要因の影響度合いを相互比較可能な形で評価することを指し、「総合的評価」と呼ぶこととした。
- 注2) 本研究では、3 種類のデータロガー付き温度センサーを用いて同時観測を行った（9 個：おんどり Jr. TR-52 T&D 社、10 個：おんどり TR-72U T&D 社、20 個：サーモレコーダーRS-11 エスベック社）。なお、3 種類の測定器を用いているため、器差補正を行った。
- 注3) 本研究では、気象庁の晴れ日数、降水日数、真夏日の定義²⁰⁾²¹⁾を参考に、夏季晴天日の抽出条件を作成した。なお、晴れ日数、降水日数、真夏日の定義は以下のとおり。
晴れ日数：日照時間が可照時間の 40%以上の日数。
降水日数：日降水量 1mm 以上の日数。
真夏日：日最高気温が 30°C 以上の日。
- 注4) 海風が吹く時間帯に関しては、広島地方気象台の風向データを用いて、典型的夏季晴天日の風向度数分布を作成し（図 16）、この図より海風が吹く時間帯は 10 時～20 時と判断した。
- 注5) ここで「平野部」は、以下の 2 つの条件を満たすエリアと定義した。
・標高が 50m 以下。
・メッシュ内の最大面積を占める土地利用（国土数値情報）が「混合林」、「水域」でない。
- 注6) 建物遮蔽率、および周辺河川面積算出には、Arc GIS データコレクションの建物データと水域データを用いた。
- 注7) 建物遮蔽率算出の際に使用する半径 r は、その値が長いほどより離れた建物の影響を受ける可能性がある。また高さ h は、その値が大きいほど、低い建物の影響を受けにくい。なお、r=100、h=5 の組み合わせの場合、実質的には最も近い建物までの距離の影響が大きい。
- 注8) 夏季の衛星画像は雲量が多く、平野部全域の NDVI 平均値を正確に算出することが困難であったため、本研究では春季の衛星画像を使用した。しかし、夏季の衛星画像（2012 年 9 月 2 日に ASTER により撮影された画像）から作成した NDVI と、本研究で使用した春季の NDVI との間には、相関係数 0.93 と高い相関が見られた（夏季の衛星画像で雲のないエリアのみを対象）。このことから、本研究において春季の衛星画像を用いることに大きな問題はないと判断した。
- 注9) 本研究における NDVI の算出式を以下に示す。なお、ここでは値を見やすくするために、一般的な定義における NDVI の 100 倍とした。

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \times 100$$

NIR：近赤外バンドの反射率、Red：可視バンド（赤）の反射率

- 注10) 河川の効果を把握するために、補足的に平野部内の海岸から約 10km 以内の観測点（全 27 地点）を対象に、河川との位置関係や川幅の影響等についての分析を行った。結果を以下に記す。
既往研究²²⁾では、気温分布に対する河川の影響範囲は 100m～500m 程度と示されている。そこで、各観測点について周辺半径 100m、200m、300m、400m、500m の圏内に、それぞれ①河川がない、②河川幅が 100m 未満の河川がある、③河川幅が 100m 以上の河川がある、という判定を行い、3 分類別の気温差（10 時～20 時の平均気温を使用）の有意性

の判定を行った（図 17）。その結果、全ての周辺半径において、①②③の間に有意な気温差は見られなかった。これらの気温観測点群は、広島平野内の気温分布を把握することを意図して設定したものであり、文献 12 で指摘されているような河川が周辺に及ぼすローカルなスケールの影響を把握するための空間密度を有していないものと考えられる。なお、ここでの分析に際して、河川データとして、対象地の水域データ^{注6)}と国土数値情報の一級河川データを用いた。

- 注11) 文献 23 の手法により、広島市都市計画基礎調査（2000 年）のデータを用いて、観測点周辺の人工排熱量を推定し、気温との関係について分析した結果、両者にはある程度の相関関係があることを確認しており、本報で取り上げた 4 つの気温分布形成要因の気温に対する影響には、人工排熱量の影響も含んでいるものと考えられる。なお、人工排熱量推定の際の、観測点からの評価半径については 100m から 500m までを 100m ごとに算出した。

参考文献

- 1) 森山正和編：ヒートアイランドの対策と技術，学芸出版社，2004
- 2) 日本建築学会：ヒートアイランドと建築・都市－対策のビジョンと課題，日本建築学会，2007
- 3) 田中貴宏・山崎恵子・森山正和：地方自治体の都市計画関連業務を支援するための都市環境気候地図のあり方に関する研究－GIS を活用した大阪府堺市の都市環境気候地図の作成－，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-1，pp.969-970，2008.7
- 4) 竹林英樹・森山正和：海風の影響を受けた都市ヒートアイランド現象，日本建築学会技術報告集，21，pp.199-202，2005.6
- 5) 十二村佳樹・渡辺浩文：夏季の広域都市気温分布実態と風が緑被率と気温との関係に及ぼす影響に関する研究－東北地方沿岸都市・仙台における長期多点測定結果に基づく分析－，日本建築学会環境系論文集，612，pp.83-88，2007.2
- 6) 十二村佳樹・渡辺浩文：海風の夏季都市気温緩和効果に関する研究－気温の長期多点同時測定と観測風データに基づく分析－，日本建築学会環境系論文集，623，pp.93-99，2008.1
- 7) 石田勝美・宗廣耕市・松下拓真・堀越哲美：中山間地域都市としての郡上市八幡町における山地・河川が市街地の気温分布に及ぼす影響に関する研究，日本生気象学会雑誌，50(1)，pp.37-47，2013.5
- 8) 平野勇二郎・茅陽一：関東平野南部における都市気温分布の時空間構造解析，GIS-理論と応用，6(2)，pp.11-22，1998.9
- 9) 武市伸幸：高知市の夜間の気温分布と地形的要因の影響，天気，41(5)，pp.243-249，1994.5
- 10) 宮田賢二編：広島県の実地風，溪水社，1982
- 11) 清田忠志・清田誠良：夏季の広島市広域圏における海陸風が気温に及ぼす影響に関する研究，日本建築学会環境系論文集，587，pp.45-51，2005.1
- 12) 清田忠志・清田誠良：都市域におけるヒートアイランド現象の緩和対策に関する研究－その 2 広島市の夏季の都市気温と土地被覆との関係に対する重回帰分析－，日本建築学会環境系論文集，614，pp.57-63，2007.4
- 13) 野口翔平・田中貴宏・佐土原聡：盆地都市における夏季気温形成要因に関する研究－神奈川県秦野市における都市環境気候地図作成のための基礎的検討－，日本建築学会中国支部研究報告集，36，pp.471-474，2013
- 14) 小川琢也・村川三郎・西名大作・田中貴宏・深川健太・高橋一郎：山間地域における土地利用および日射環境が周辺の気温に及ぼす影響に関する研究－実測結果と GIS を用いた分析－，日本建築学会技術報告集，17，pp.245-248，2011.2
- 15) 森博明・北田敏廣・弥田賢次：移動性高気圧通過時の濃尾平野における海陸風の鉛直構造，天気，45(7)，pp.515-530，1998.7
- 16) 野口翔平・田中貴宏・佐土原聡：盆地都市における夏季気温分布の形成要因に関する研究－観測結果と GIS を用いた分析－，日本建築学会技術報告集，46，pp.1029-1034，2014.10
- 17) 竹内章司：衛星画像の植生指標による画素内緑被率の推定，写真測量とリモートセンシング，26(4)，pp.4-12，1987.10
- 18) 入江輝昭・平野侃三：緑地周辺に対する気温低減効果と効果的な緑地の分布形態に関する研究－東京・埼玉地域を事例として－，都市計画論文集，36，pp.277-282，2001.10
- 19) 天野智順・中川敬介：ランドサットデータを用いた都市域の気温と土地

- 被覆との関連性，富山県立大学紀要，17，pp.108-113，2007.3
- 20) 気象庁：天気とその変化に関する用語，
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/tenki.html，
(accessed 2015-7-16)
- 21) 気象庁：気温に関する用語，
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/kion.html，
(accessed 2015-7-16)
- 22) 村川三郎・関根毅・成田健一・西名大作：都市内河川が周辺の温熱環境に及ぼす効果に関する研究，日本建築学会計画系論文報告集，393，pp.25-34，1988.11
- 23) 神奈川県：平成 16 年度ヒートアイランド現象実態調査報告書，pp.1-88，2005

A STUDY ON SUMMER TEMPERATURE DISTRIBUTIONS IN HIROSHIMA PLAIN

Analysis on the causes of temperature distributions based on multi-point measurement in summer

Kaoru MATSUO^{} and Takahiro TANAKA^{**}*

^{*} Grad. Stud., Graduate School of Engineering, Hiroshima Univ.

Research Fellow of Japan Society for the Promotion of Science

^{**} Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Hiroshima Univ., Dr. Eng.

In recent year, urban heat island phenomena caused by land cover change and increase of anthropogenic heat release occur in many cities of Japan. The temperature rises in urban area because of such urban heat island phenomenon and global warming. Accordingly, various problems such as the uncomfortable outdoor environment in summer, the increase of energy consumption, the effect on urban ecosystem and the damage to human health can be seen. Consequently, urban planning incorporating mitigation of the urban warming is needed. The mitigations that are thought to be suitable in each place should be selected, because the climatic characteristics are different by places in urban area. Accordingly, Urban Environmental Climate Maps (UECMs) are proposed as a tool for examining the suitable mitigation in each place. For making UECMs, at first, it is necessary to understand the summer temperature distribution patterns and the factors of them in urban area.

In many studies, observing temperatures and proving the relationship between temperature and factors for understanding that climatic characteristics have been performed. However, for making UECMs, comprehensive evaluations of the relationships must be performed. Therefore, this study aims at evaluating the relationship between temperature and the factors comprehensively using observed data in Hiroshima plain.

This study progressed by the following steps. 1) Extracting fine weather day. 2) Analyzing the relationship between temperature and each factor (distance from the coastal line in the direction of sea breeze, surrounding ventilation condition, surrounding green area and surrounding river area). 3) Evaluating comprehensively by multiple regression analysis.

In the step 2), first, the relationship between temperature and distance from the coastal line in the direction of sea breeze is analyzed. As a result, in the daytime, temperature tends to be higher in the inland area because temperature distribution is affected by sea breeze. In the nighttime, temperature tends to be higher in the coastal area because temperature distribution is affected by sea temperature. Second, the relationship between temperature and surrounding ventilation condition is analyzed using the rate of building blocking (RBB). As a result, in the daytime, the correlation between temperature and RBB in south-southwest direction is larger. In the nighttime, the correlation between temperature and RBB in north-northeast direction is larger. It is considered that the temperature tends to be higher in the area that RBB in the direction of windward is higher. Third, the relationship between temperature and surrounding green area is proved using NDVI map. As a result, in the nighttime, the negative correlation between temperature and NDVI is larger, because the temperature distribution is affected by surrounding green area. Forth, the relationship between temperature and surrounding river area is analyzed using the water cover area. As a result, the correlation between temperature and water cover area is lower than other factors.

Finally, the multiple regression analysis is performed for evaluating influence of those factors. Actually, distance from the coastal line in the direction of sea breeze, RBB in south-southwest direction, RBB in north-northeast direction, surrounding green area and surrounding river area are selected as explained variables, also, the temperature in fine weather days are used as response variables. As a result, in the daytime, distance from the coastal line in the direction of sea breeze and RBB in south-southwest direction have effects on the temperature distribution. In the nighttime, RBB in north-northeast direction and surrounding green area have effects. As a future works, developing the urban planning techniques incorporating the urban warming mitigation based on the result of these results.

(2015年3月10日原稿受理, 2015年8月17日採用決定)