

原著論文

岡山県倉敷市における夏季ヒートアイランド現象の長期観測

佐藤真由美¹・大橋唯太²

Long-term observation of summertime heat-island phenomena in Kurashiki City, Okayama
Prefecture, Japan

Mayumi SATO¹ and Yukitaka OHASHI²

Abstract: We revealed features of heat-island phenomena in Kurashiki City, Okayama Prefecture, by long-term observation at many sites during the summer in 2009. The heat island which had the heat-island intensity of 1~3°C frequently appeared during nighttime at the south region of the JR Kurashiki Station. Its horizontal scale was 4 kilometers square maximum, and the high temperature zone expanded around the center of commercial building region. At nighttime of clear day, (1) a significantly negative correlation between the surface-air temperature and the sky view factor appeared, and (2) a relationship between the surface wind speed (U) and the heat-island intensity (HII) was represented as a simple linear regression line: $HII = -0.66U + 2.6$.

I. はじめに

郊外に比べて都市部が高温となる現象はヒートアイランドと呼ばれ、その進行程度を示す指標の1つとして、都市部と郊外の最大気温差から求めるヒートアイランド強度(以降、HII)が存在する(Oke 1973). HIIは都市人口の対数に比例することが報告されており(たとえば、朴・河村 1986), 都市化の進展に伴ってこの数値は大きくなっていくことが予想される.

日本は都市の急速な拡大と発展から、多くの地域を対象にした多分野による研究が数多く進められてきた. 日本の最大都市である東京23区や関東平野を対象とした研究には河村(1977), Fujibe(1988), 小林(1990), 山添・一ノ瀬(1994), 横山ほか(2005), 亀野ほか(2008)など数多く存在するだけでなく、気象

庁によるヒートアイランド監視報告(<http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/himr/index.html>)も毎年実施・公表されている. 一方、小規模・中規模都市を対象とした研究には、長野県小布施町で調査をおこなった榊原(1999)や広島市で調査をおこなった清田ほか(2007)など、枚挙にいとまがない.

人口約70万人を有する岡山県岡山市においても、移動観測車による1980年のヒートアイランド観測を皮切りに現在まで多くの研究が報告されている(たとえば、佐橋 1983, 石本 2000, 重田・大橋 2009). このなかで重田・大橋(2009)は時空間的に密な定点気象観測をおこない、夏季の夜間には3~4°C, 冬季の夜間には4~5°Cの強度をもったヒートアイランドが発生していることを確認している. この結果は、朴・河村(1986)による都市人口とHIIの単回

1. 岡山理科大学総合情報学部生物地球システム学科, 現 (株) ZAGZAG

2. 岡山理科大学総合情報学部生物地球システム学科 〒700-0005岡山市北区理大町1-1 Department of Biosphere-Geosphere System Science, Faculty of Informatics, Okayama University of Science, 1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama-shi 700-0005, Japan

帰直線から推定される値である4.4℃にほぼ近似していた。

一方、岡山県下では岡山市に次ぐ大都市、倉敷市(人口約48万人)のヒートアイランド現象も、石本(2000)や藤井(2001)の研究報告例が存在する。しかし、これらは岡山・倉敷間の移動観測や3地点の定点観測の結果に限られるため、倉敷市の詳しい水平気温分布が時間発展を含めて明らかにされていない。一般にヒートアイランドは、都市の街区構造や郊外の土地利用形態によっても特徴が大きく異なるなど、地域特性の強い現象と言われている。したがって、様々な都市がもつヒートアイランド特性の情報を蓄積することは基礎資料として役立つだけでなく、今後のヒートアイランド研究の進展や都市気候の改善計画に対する大きな貢献につながるものと考えられる。

そこで本研究では、岡山県倉敷市を対象として面的時間的に十分密な多地点の定点気温観測を実施し、倉敷市で発生する夏季のヒートアイランド現象の実態を明らかにする。

II. 観測概要

観測は2009年7月21日～9月18日(計60日間)の夏

季に実施し、地上気温を連続取得した。観測対象領域は、瀬戸内海から北に約10km離れた倉敷市街地を中心とする東西約7km・南北約7kmの範囲とした。

測定地点は、地表面状態や局所環境が類似する公園25カ所と水田域内1カ所の計26カ所設けた。図1に観測地点の位置と名称を示す。地点の名称は領域格子に付記したアルファベットと数字を組み合わせて作ってある。ただし、地点D4には測定地点が2つあるため、D4のうち北側の地点をD4n, 南側の地点をD4sと呼称する。

測定される気温への局所的な障害物の影響を避けるため、天空率が0.5以上の空間で地上高2.5mの北向きを測定器の設置条件とし、街灯や樹木などに取り付けた。ただし、図1中の地点A6とE6は例外で、測定器は南向きに設置された。また、各測定地点では、魚眼レンズ(等距離射影方式)を装着した一眼レフカメラを用いて地表面上0.5mの高さから天空写真を撮影し、全天写真解析プログラムCanopOn2(<http://takenaka-akio.cool.ne.jp/etc/canopon2/>)によって天空率を算出した。

地上気温の測定には、サーミスタ温度計(おんどとりJr. RTR-52;T&D)を使用した。ただし、測定器のセンサ部分への日射を遮るため、重田ほか

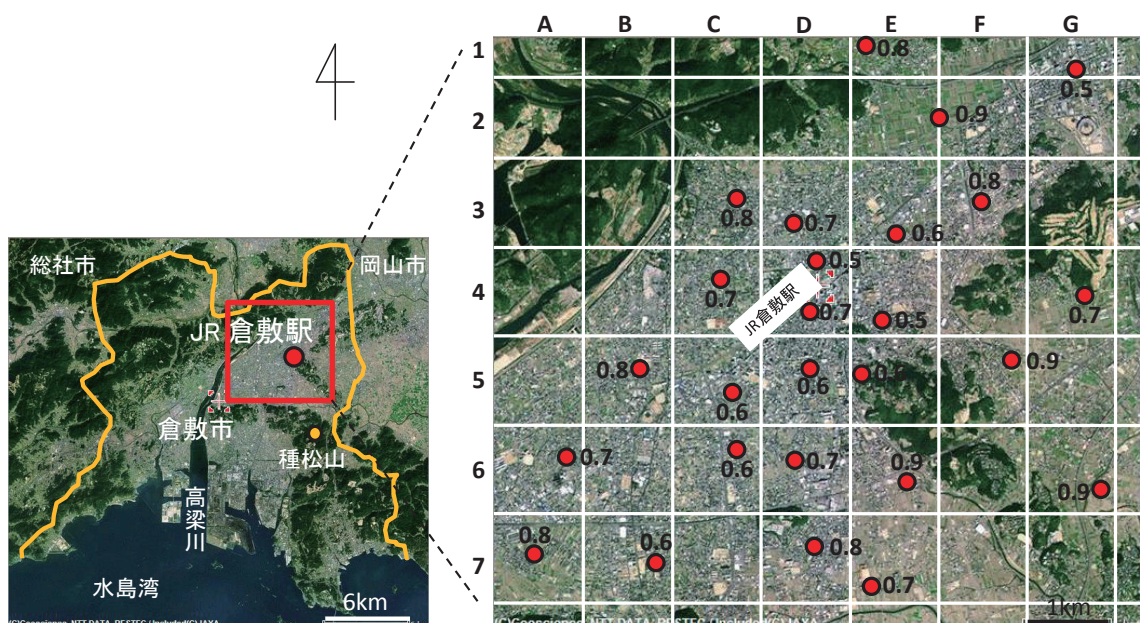


図1. 観測対象領域と定点観測地点(赤丸印)の位置。各地点の天空率を数字で表している。外枠のアルファベットと数字を組み合わせた文字を地点名として表記する。

(2008)によって開発されたシェルターを装着している(図2)．気温のサンプリング間隔は1分とし、解析には正時を中心とする20分平均値を用いることにした．

各測定器がもつ器差を確認するため、定点観測実施の前後に室内検定を実施している．その結果、器差はセンサ自体のカatalog精度($\pm 0.3^{\circ}\text{C}$)を含めて考えても 0.5°C の範囲内におさまった．この検定結果をもとにして観測値をそれぞれ補正することにした．

III. ヒートアイランド強度(HII)の算出

ヒートアイランド現象を定量化する評価指標として既存研究で多く用いられているHIIを、本研究でもヒートアイランド出現の指標として採用した．HIIは都市部の気温(T_u)と郊外の気温(T_r)の差で表される：

$$\text{HII} = T_u - T_r \quad (1)$$

このHIIの算出にはいくつかの方法があるが(たとえば、Oke 1973, 田宮・大山 1981), 本研究では地上気温の空間的代表的性のある程度確保する目的で都市部と郊外のそれぞれ3地点の平均気温からHIIを求めた．ここで、都市部と郊外を代表する地点の選定方法が重要となる．ヒートアイランドは市街地の形態や地表面の熱的性質と密接な関係があることから(松本ほか 2002), 倉敷市都市計画課が公開する倉敷市都市計画図(<http://www.city.kurashiki.okayama.jp/dd.aspx?menuid=1246>)の“商業地域”と“近隣商業地域”に含まれる地点D4s・E4・E5を都市部に、これらを取り囲む“用途なし地域”の地点A7・E1・G6を郊外に選び、HIIの計算に用いることとした(図3)．

IV. 結果

2009年8月17日13時と20時に観測された地上気温の空間偏差分布を図4に示す．ただし、観測地点の存在しない領域北西部(高梁川以西)は、図に描かれた気温分布の信頼性が低いので注意が必要である．

日中にはJR倉敷駅とJR西阿知駅の付近で局所的な高温域が、反対に水田地帯のF2や田畑の広がる領域南西・南東部で低温域が出現している(図4a)．この低温域は榊原(1999)による指摘と同様に、水田域の

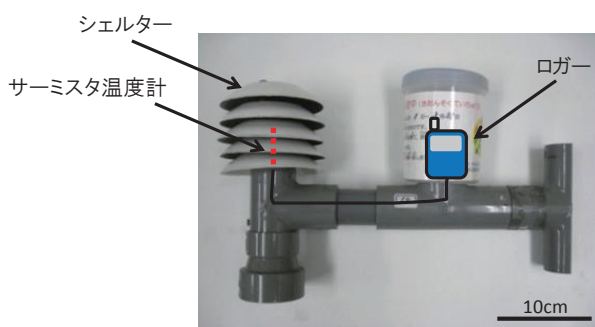


図2. 観測に用いた気温測定器．

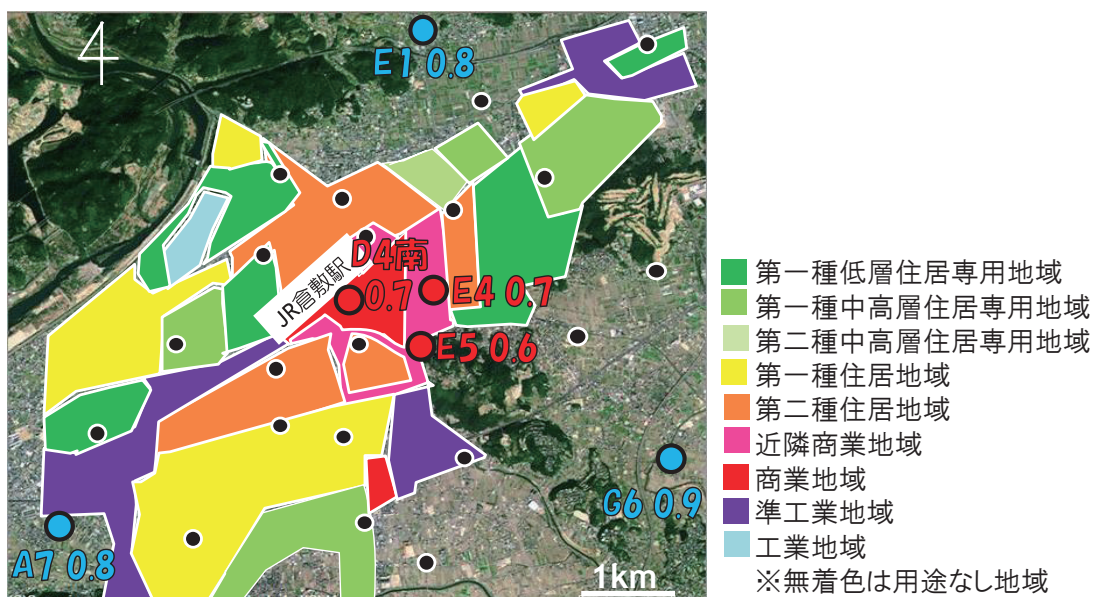


図3. 観測地域の土地利用分布．倉敷市都市計画図(倉敷市都市計画課)をもとに作成．赤丸は都市部、青丸は郊外としてHIIの計算に用いた観測地点であり、数字はその地点の天空率を表す．黒丸はその他の観測地点を示している．

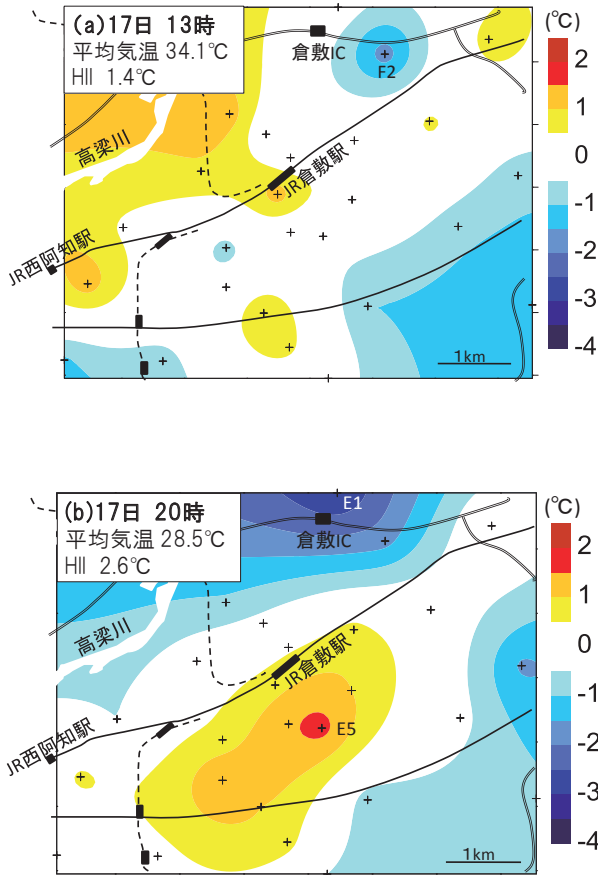


図4. 2009年8月17日(a)13時と(b)20時における地上気温の空間偏差分布. 左上には時刻・全観測地点の平均気温・HIIを示してある. 図中の+は観測地点を表す.

水面や稲の葉面からの蒸発散が活発におこなわれ、日中の気温上昇が抑制された結果として形成されたものと考えられる. このような傾向は観測期間中の多くの日で認められ、倉敷市の夏季日中における典型的な気温分布といえる. 岡山市では夏季日中に都市部が1℃ほど低温となる現象が報告されているが(重田・大橋 2009), 本研究における倉敷市の観測からはそれが確認されなかった.

一方、夜間はJR倉敷駅の南側で明瞭なヒートアイランド現象が出現している(図4b). この日にHIIが極大値をとったのは20時で、2.6℃であった. このとき最も気温が高かったのはE5で30.2℃、反対に最も気温が低かった地点はE1で25.5℃であり、4.7℃の最大気温差を示していた.

観測期間中に確認された倉敷市のヒートアイランド現象は、日没直後からJR倉敷駅の南側で出現しはじめて19～21時に最も顕著となり、それ以降は明け方にかけてしだいに不明瞭となっていく変化をたど

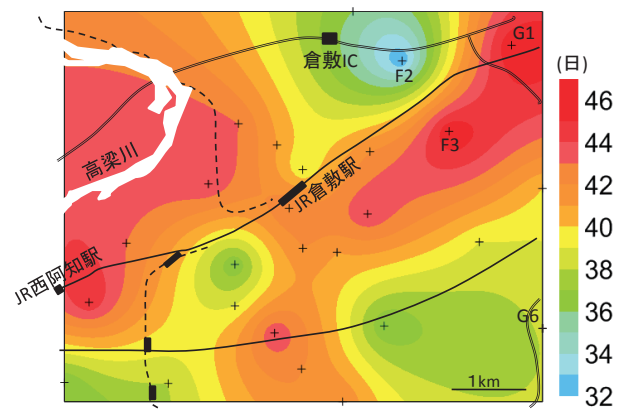


図5. 観測期間中(2009年7月21日～9月18日)における真夏日日数の分布. 図中の+は観測地点を表す.

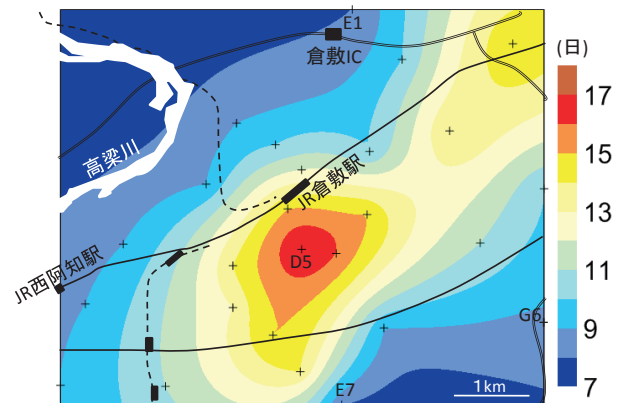


図6. 観測期間中(2009年7月21日～9月18日)における熱帯夜日数の分布. 図中の+は観測地点を表す.

っていた. この出現傾向は、岡山市で報告されているヒートアイランド現象の特徴とも類似する. しかし、岡山市のHIIは3～4℃であるのに対し(重田・大橋 2009), 今回観測された倉敷市のHIIは1～3℃であった. これはおそらく都市規模(建物の高度や密集度, 人工排熱量など)の違いに起因するものと推測される. また、朴・河村(1986)によれば倉敷市と同程度の人口規模を有する都市のHIIは約3.6℃であるが、本研究で観測されたHIIはそれよりもやや小さい.

欠測日を除いた観測日48日間のうち、18時から翌朝5時までに1℃以上のHIIを伴うヒートアイランド現象が発生した日は33日間(出現率69%)であった. また、ヒートアイランドの水平規模は最大で東西約4km・南北約4kmである様子も明らかとなり、その高温域は商業地域を中心として北東・南西の住宅地域へと伸びていた. この高温域は図3で示した土地利用分布とよく対応していることから、夜間のヒート

アイランドが土地利用形態の地理的分布に強く依存していることが推測される。

観測期間60日のあいだに観測された真夏日日数の分布を図5に、熱帯夜日数の分布を図6にそれぞれ示す。ここで、地点G6は一部欠測があったため、図5・6の作成からは除外してある。図4の気温分布と同様に、観測地点の存在しない領域北西部と南東部は、図に描かれた日数の信頼性が低いので注意が必要である。真夏日は日最高気温が30℃以上の日を指すが、最も真夏日日数が多かったのはF3とG1で46日、反対に最も真夏日日数が少なかったのはF2で32日と、そのあいだには最大14日の差がみられた。一方の熱帯夜とは夜間の日最低気温が25℃以上の日を指すが、最も熱帯夜日数が多かったのはD5で17日、反対に最も熱帯夜日数が少なかったのはE1とE7で8日であり、最大で9日の差がみられた。熱帯夜日数の分布はヒートアイランドの水平分布とよく類似した、JR倉敷駅の南側を中心とする、いわゆる“熱帯夜の島”が出現していた。

V. 考察

1. 地上気温と天空率の関係

HIIで表される都市部と郊外の気温差は、都市と郊外の大気熱収支の違いによって引き起こされる(Oke 1988)。この熱収支にはおもに人工排熱・移流・地表面や建物からの乱流輸送・放射が関与するが、特にその場の放射環境の目安として天空率を使うことができる。そこで、ここでは晴天日と曇天日にわけて地上気温と天空率の相関関係を分析してみた。本研究では8月の可照時間13.5時間の70%以上にあたる日積算日照時間9.5時間以上の無降水日を晴天日、20%未満にあたる日積算日照時間3時間未満の無降水日を曇天日と定義した。この条件判定には、図1のD5内に位置する倉敷アメダスの毎時気象データを利用した。

無相関検定で5%有意水準を採用した場合、相関係数の有意値はサンプル数(観測地点数)26で+0.4以上または-0.4以下となる。一方、1%有意水準を用いた場合は0.5以上または-0.5以下で有意となる。

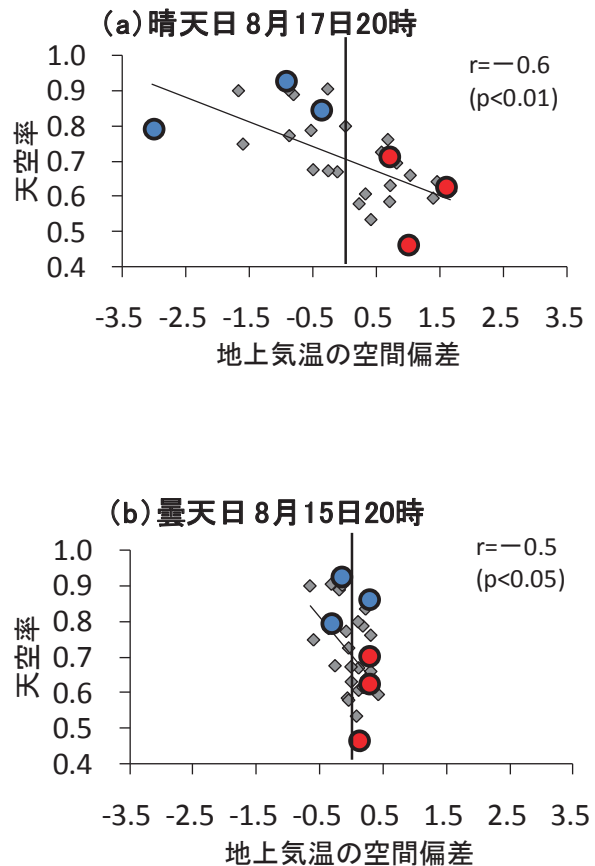


図7. (a)晴天日8月17日と(b)曇天日8月15日の20時における地上気温の空間偏差と天空率の相関。赤丸と青丸はHIIの計算に用いた都市部と郊外の地点をそれぞれ表す。

ヒートアイランド現象が顕著となる夜間20時において、晴天日と曇天日それぞれ典型事例の地上気温と天空率の相関を図7に示す。ただし、地上気温は空間偏差の値を用いてある。晴天日には相関係数が-0.6で、1%有意水準を満たす相関関係が認められている(図7a)。このうち、天空率が小さくかつ気温の高い地点は都市部、反対に天空率が大きく気温の低い地点は郊外であり、HIIの計算に用いた地点のあいだで明瞭な差異が現れた。一方、曇天日でも相関係数が-0.5で、5%有意水準を満たす相関関係が認められるが(図7b)、晴天日のような都市部と郊外の明瞭な気温の乖離はみられない。このような相関図を1時間ごとに作成し、求めた相関係数を時系列化したものが図8である。晴天・曇天ともに18時から翌朝6時にかけて有意な負の相関が認められる。これは、天空率の大きな場所ほど夜間の地上気温が低くなることを意味している。特に晴天日は相関係数(5%または1%有意)の日による分散も

曇天日に比べて小さいことから、地表面の放射冷却作用がヒートアイランド形成に強く関与していると考えられる。

2. HIIと風速の関係

倉敷市のヒートアイランドは夜間19～21時に顕著化していた。そこで、ヒートアイランド形成時の気象条件を理解するため、HIIと地上風速の関係を調べてみた。晴天日と曇天日における20時のHIIと風速の相関を図9に示す。ここで風速は、倉敷アメダスによって観測された地上約6 m高度のデータを使用した。特に晴天日では風速が大きくなるにつれてHIIが小さくなっており、相関係数-0.6の有意な負の相関がみられる。このHIIと風速Uの関係は

$$HII = -0.66U + 2.6 \quad (2)$$

の単回帰直線で表すことができる。ただし、これは榎根(1960)や榎原(2001)が報告する風速2～3 m/s付近でHIIが極大となる結果とは異なっていた。

風速に対する夜間ヒートアイランドの成因には次の2つの考え方が指摘されている：(1)風速が小さくなるほど郊外の放射冷却で接地逆転層が発達する結果、HIIが大きくなるという考え(たとえば、水越・山下 1985)；(2)風速が2 m/s以下の弱風下のように建物等に起因する都市大気の機械的混合が起こりにくくなるとHIIが小さくなるため、ある程度の風速(2～3 m/s)がHIIを大きくするという考え(たとえば、榎原・三枝 2002)。ここで基本前提になっていることは、郊外における接地逆転層の存在である。郊外で接地逆転が生じるときにヒートアイランドが形成されるという報告(例えば、田宮・武藤 1974)がある。過去に実施された岡山市での気温プロファイルの観測からも、ヒートアイランド発生時には郊外で+6℃/100m, 都市部で-0.5℃/100mの気温勾配が確認されている(Sahashi et al. 1996)。本研究で調査された倉敷市の場合、晴天日にHIIと風速が弱風条件まで含めて明瞭な負の勾配をもった線形関係にあったことから、郊外の接地逆転層の発達にヒートアイランド形成に重要な役割を果たしていることが示唆される。つまり、風速が大きいほど郊外の接地逆転層が

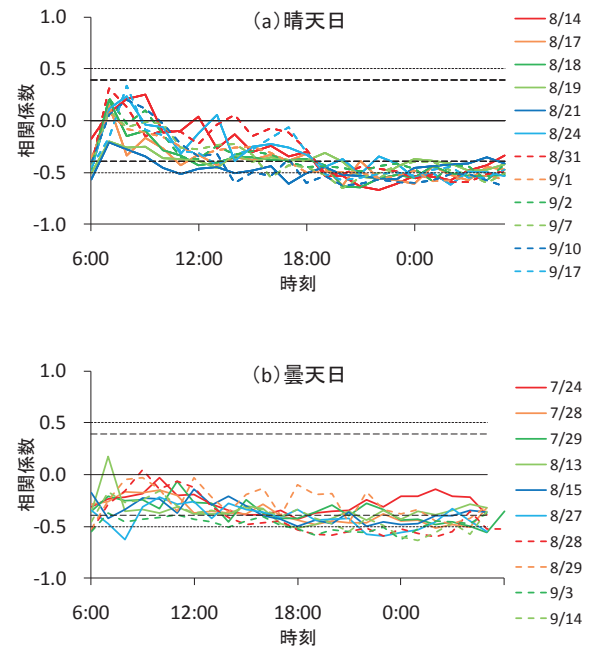


図8. (a)晴天日と(b)曇天日における地上気温と天空率のあいだの相関係数の時系列変化。破線は5%有意水準の相関係数である ± 0.4 、点線は1%有意水準の相関係数である ± 0.5 を表している。

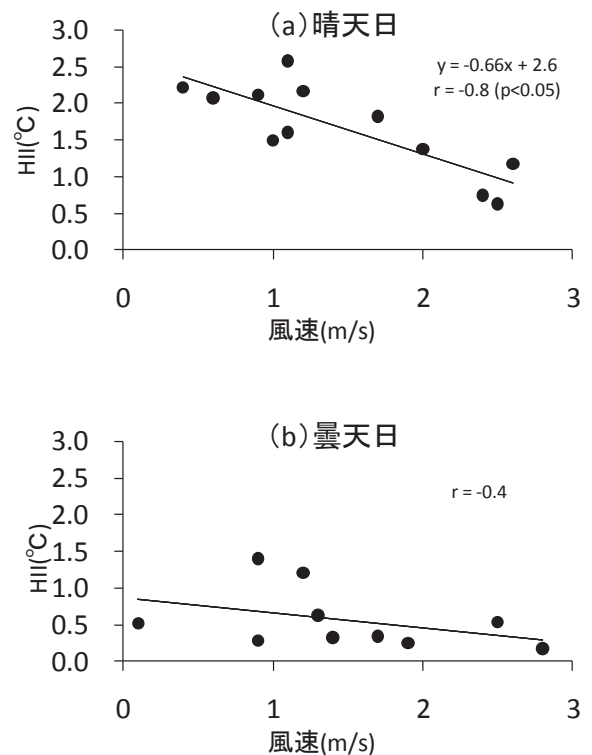


図9. (a)晴天日と(b)曇天日における20時のHIIと地上風速の相関。実線は単回帰直線を表す。

破壊されやすく(または発達しにくく)ヒートアイランド強度が小さくなる, 反対に風速が小さくなれば郊外の接地逆転層がよく発達し, その結果ヒートアイランド強度が大きくなる。

VI. おわりに

本研究では岡山県倉敷市を対象に, 2009年夏季の長期的な定点気温観測を実施した。その結果, 次の特徴が明らかとなった。

- ・日中は, 北部の水田域や田畑が存在する南西部と南東部で低温地帯が形成されていた。
- ・夜間にはJR倉敷駅の南側を中心にヒートアイランド強度1～3℃をもった明瞭なヒートアイランド現象が連日発生していた。これは晴天日条件ほど, より顕著化する。
- ・天空率と夜間気温のあいだには有意な負の相関が認められた。
- ・晴天日の夜間は, 風速Uが小さい条件ほどヒートアイランド強度HIIが大きくなる関係が現れていた。これは, $HII = -0.66U + 2.6$ という単回帰直線でよく表すことができる。

謝辞

本研究を進めるにあたり, 温度計の設置などで多大なご協力を頂きました倉敷市役所公園緑地課, 岡山大学大学院自然科学研究科の重田祥範氏, 岡山理科大学総合情報学部 of 岩下政文氏に心より謝意を表します。

引用文献

- Fujibe, F. (1988). Weekday-weekend differences of urban climates Part 3: temperature and wind fields around Tokyo and Osaka. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 7:769-779.
- 藤井清香(2001). 岡山市におけるヒートアイランドの水平分布に関する研究. 岡山大学大学院自然科学研究科修士論文。
- 榎根 勇(1960). 東京都その周辺地域における日最

低気温分布の都市気候学的考察. 地理学評論 33:564-572.

- 石本顕一(2000). 岡山市におけるヒートアイランドの観測. 岡山大学理学部地球科学科卒業論文。
- 亀野勝彦・永谷 結・柄澤孝和・梅木 清・本條 毅・三上岳彦(2008). 広域METROSによる首都圏のヒートアイランドの解析. 環境情報科学論文集 22 22 : 197-202.
- 河村 武(1977). 都市気候の分布の実態. 気象研究ノート133 : 26-47.
- 清田忠志・谷口 明・清田誠良・中村安弘(2007). 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 : 57-63.
- 小林 守(1990). 関東平野の諸都市の都市規模と都市ヒートアイランド強度. 都市化の進展に伴う都市気候の変化に関する研究(西沢利栄編). 昭和61年度～平成元年度科学研究費補助金(一般研究(A))研究成果報告書 55-61.
- 松本 太・福岡義隆・後藤真太郎(2002). 熊谷市における都市域の形態や構造の変化に伴うヒートアイランドの変化. 環境情報科学論文集16 : 387-392.
- 水越允治・山下脩二(1985). 「気候学入門」. 144pp. 古今書院.
- Oke, T.R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* 7:769-779.
- Oke, T.R. (1988). The urban energy balance. *Progress in Physical Geography* 12:471-508.
- 朴 恵淑・河村 武(1986). 都市気温の形成要因に関する考察-都市気温と天空比との関係-. 筑波大学水理実験センター報告10 : 27-38.
- 佐橋 謙(1983). 自動車による気温の移動観測における観測誤差-特に自動車の影響を中心に-. 天

気30：509-514.

Sahashi, K., T. Hieda, and E. Yamashita (1996). Nitrogen-oxide layer over the urban heat island in Okayama City. *Atmospheric Environment* 30:531-535.

榊原保志(1999). 長野県小布施町におけるヒートアイランド強度と郊外の土地被覆との関係. 天気46：567-575.

榊原保志(2001). 都市表面からの顕熱供給と都市大気の混合が夜間ヒートアイランド形成に与える影響の比較. 天気48：304-311.

榊原保志・三枝あかね(2002). 晴天日と曇天日のヒートアイランド強度の違いと夜間ヒートアイランドの成因. 天気49：533-540.

重田祥範・大橋唯太・亀卦川幸浩・井原智彦(2008). 東京・大阪における街区気象と需要エネルギーの計測(1)-小型計測機器の開発と観測ネットワークの構築-. 日本気象学会2008年度秋季大会講演予稿集. 201pp.

重田祥範・大橋唯太(2009). 岡山市を対象とした高密度な気象観測によるヒートアイランド強度の解析. 天気56：443-454.

田宮兵衛・武藤禎夫(1974). 住宅団地において夜間観測される高温域について. 気象研究ノート119：196-205.

田宮兵衛・大山秀樹(1981). 小集落に夜間発生するヒートアイランドの実態と成因について. 地理

学評論54：1-21.

山添 謙・一ノ瀬俊明(1994). 東京および周辺地域における秋季夜間の晴天時と曇天時のヒートアイランド. 地理学評論67A-8：551-560.

横山 仁・安藤晴夫・山口隆子・市野美夏・秋山祐佳里・石井康一郎・三上岳彦(2005). 夏期における東京都区部のヒートアイランドの実態について-2002年～2004年におけるMETROS観測結果-. 東京都環境科学研究所年報 3-9.

要旨

本研究では、岡山県倉敷市を対象として、2009年の夏季に長期的な定点気温観測(計26地点)をおこない、倉敷市で発生するヒートアイランド現象の実態解明を試みた。その結果、夜間においてJR倉敷駅の南側を中心に1～3℃のヒートアイランド強度をとまったヒートアイランド現象が発生していることが明らかとなった。ヒートアイランドの水平規模は最大で東西約4km・南北約4kmであり、その高温域は商業地域を中心に北東・南西ラインを軸に伸びていた。

倉敷市のヒートアイランド現象の特徴を晴天日と曇天日に分類して調べたところ、晴天日の夜間には、(1)地上気温と天空率のあいだに有意な負の相関が認められ、(2)地上風速Uとヒートアイランド強度HIIの関係が $HII = -0.66U + 2.6$ の単回帰直線でよく表されることなどが明らかとなった。

(2010年7月28日受理)