

原著論文

岡山市街地を対象としたヘリコプターによる地表面温度画像の 取得と地上気温の観測

大橋唯太¹・重田祥範²・塚本 修³

Aerial acquisition of surface temperature images by helicopter and
air temperature observations on land in the Okayama urban area

Yukitaka OHASHI¹, Yoshinori SHIGETA², and Osamu TSUKAMOTO³

Abstract: The radiative environment in the Okayama urban area was captured by the thermal image camera on a helicopter during daytime in the summer of 2008. The higher and lower surface temperatures were specified by the thermal images. Maximum spatial heterogeneity of 10°C was confirmed within a radius of about 13 km of the Okayama urban area. The heterogeneity of observed air temperatures did not correspond entirely to that of the surface temperatures. The results indicate that, in the urban thermal environment, the decrease of infrared radiation emitted from urban surfaces leads to a reduction of the radiative heat load onto human bodies.

I. はじめに

近年、都市部で発生するヒートアイランド現象は環境問題の主要な一つとして、メディア等で大きく取り上げられるようになってきている。このヒートアイランド現象は都市特有の熱環境として、これまで多くの研究がされてきた。しかし、都市のような複雑な地表面では土地被覆状態や建築物の影響を強く受けて大気熱分布が非一様となるため、ある地点で測定された気温がどの程度の空間スケールを代表しているかは、あまり定かではない。この問題は、観測地点をできるだけ多く設けてその平均気温を用いることで、空間代表性を議論している(たとえば、Sugawara 2001)。このような都市の気温と表面温度の観測は、古くから数多くの研究が存在しており(たとえば、Winkler et al. 1981, Lee 1993, 鈴木ほか 2001, 巖・三上 2004, 鍋島ほか 2006, Hicks

et al. 2010)、日本各地の都市における大気熱環境の実態も明らかにされている。都市表面の温度分布については、リモートセンシング技術を利用した上空からの熱赤外画像の取得によって明らかにされた研究もいくつかみられる(たとえば、斎藤ほか 1977, Nichol 1998, 上田ほか 2004)。

岡山市を対象とした過去のヒートアイランド研究では、夏季の日中に都市部で郊外よりも1.5°C低温になるクールアイランド現象が、一方、夜間には等温線が市街地を中心に同心円状に分布する明瞭なヒートアイランド現象が出現すると、報告されている(重田・大橋 2009)。しかし、そのほとんどが地上気温に限られた研究であり、実際に都市大気熱環境(すなわち気温)形成のメカニズムを理解するには、先述のような大気と接する都市の表面温度の実態も明らかにすることが必要である。

1. 〒700-0005 岡山県岡山市北区理大町1-1 岡山理科大学生物地球学部生物地球学科 Department of Biosphere-Geosphere Science, Faculty of Biosphere-Geosphere Science, Okayama University of Science, 1-1, Ridai-cho, Kita-ku, Okayama-shi, Okayama-ken 700-0005, Japan.
2. 〒360-0194 埼玉県熊谷市万吉1700 立正大学地球環境科学部環境システム学科 Department of Environmental Systems, Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University, 1700, Magechi, Kumagaya-shi, Saitama-ken 360-0194, Japan.
3. 〒700-0082 岡山県岡山市北区津島中1-1-1 岡山大学大学院自然科学研究科 Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 1-1-1, Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama-shi, Okayama-ken 700-0082, Japan.



図1. 四国航空(株)所有のヘリコプターAS350B3(左)と熱赤外カメラの撮影場所(右).

著者らは2008年の夏季に、熱赤外カメラをヘリコプターに搭載して上空から岡山市街地を観測する機会を得ることができた。そこで、これと同期して地上気温の多点観測も実施することで、都市を構成する道路や建築物などの表面温度と気温の関連性を考察した。本論文は、日中の都市気候形成の議論において一助となる貴重な観測資料と位置付ける。

II. 都市熱環境の観測

1. ヘリコプター観測

ヘリコプターによる地表面温度の測定は、2008年8月5日と同月7日の2回、実施することができた。測定時間は、日中の11～14時のあいだに設定した。

熱赤外カメラ (TH7102 ; NEC三栄社製) をヘリコプターAS350B3に持ち込み(図1)、高度約800mから10秒毎に地表面放射温度を図2に示すような経路で連続撮影した。岡南飛行場を発着場所にして、岡山市北区北方付近を測定開始地点(図2中のSTART)、南区西市付近を測定終了地点(図2中のEND)とし、8月5日は12時48分～13時58分、同月7日は午前11時15分～午後12時17分に表面温度の水平分布を測定した。ヘリコプターの飛行高度800m時における熱赤外面像の空間分解能は約1.3mを有し、撮影範囲は南北約310m、東西約410mとなった。

ヘリコプター前部には温度計を固定し、上述の表面温度の水平分布観測後に高度1300mまでの気温と比湿の鉛直プロファイルを測定した。このときの測定高度と外気圧は、ヘリコプターに搭載された機

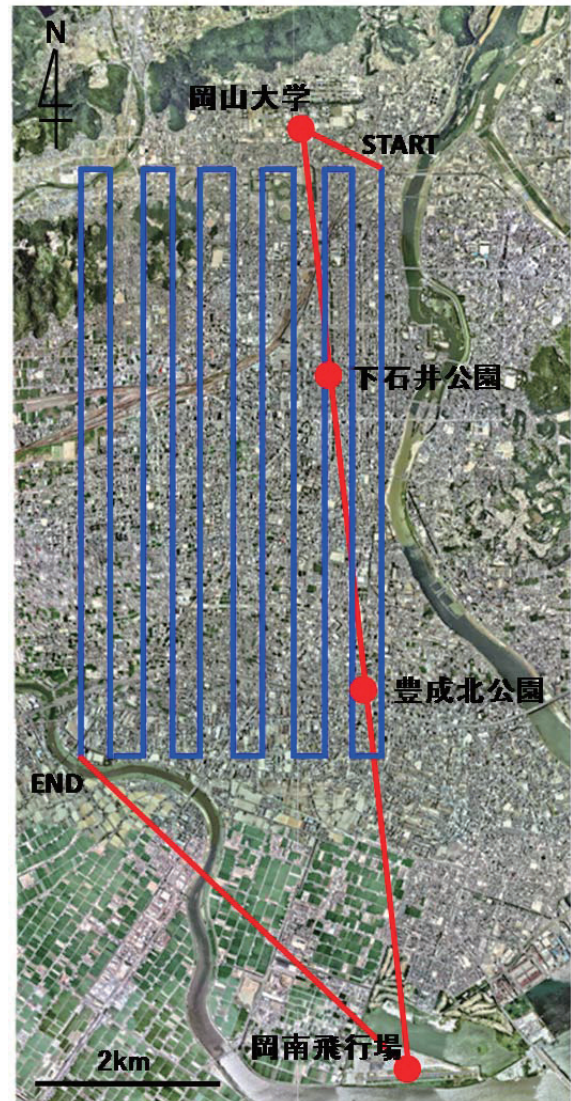


図2. ヘリコプターによる地表面温度の測定範囲。青線は飛行ルート (STARTが測定開始点, ENDは測定終了点), 赤丸は気温プロファイルの測定地点を示す。

器によって1秒ごとに記録された。測定地点は図2に示すように、南から順に岡南飛行場(測定高度の範囲: 20～1300m)、豊成北公園(260～1300m)、下

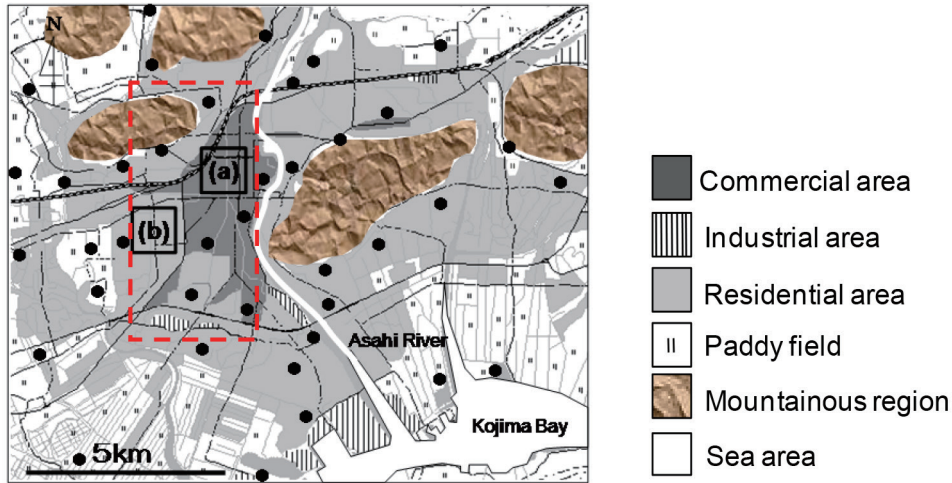


図3. 地上観測を実施した地点の分布. 黒丸印が気温を測定した地点を表す. 赤い波線の枠は、図2のヘリコプター飛行ルート範囲(青線)を示している. (a)と(b)の枠内は、それぞれ商業街区と住宅街区での集中観測地域を表している.

石井公園(260~1300m), 岡山大学(260~1300m)の4か所である.

地表面はステファン・ボルツマンの法則に従い、その温度に応じた赤外放射エネルギーを射出する. したがって、地表面から離れた任意の高度で、地表面から射出される赤外放射量を測定することによって、地表面温度を推定することができる. この場合、地表面と観測する高度のあいだに存在する温室効果気体(H_2O や CO_2 など)の赤外線の吸収・放射作用を補正する必要がある. この補正には、森(1995)や近藤(2000)の補正式がよく用いられている. 本研究では近藤(2000)によって提案されている補正式(1)を用いて、熱赤外カメラで測定された放射温度に対して大気補正を施した.

$$T_s^5 \approx \frac{T_{obs}^5 - \varepsilon^* T^5 - (1 - \varepsilon_{sfc}) T_{sky}^5}{(1 - \varepsilon^*) \varepsilon_{sfc}} \quad (1)$$

ここで、 T_s は求める地表面温度(K), T_{obs} は地物表面の射出率を1.0に設定して測定した放射温度(K), ε^* は赤外カメラの波長範囲(8.5~12.5 μm)に対する大気平均射出率(0.019)を表す. ε_{sfc} は地物表面の射出率であり、土地被覆種類(水田・土壌・アスファルト・コンクリートなど)に応じて0.96~0.97の範囲で与えた(近藤 2000). T は地表面と測定高度のあいだに存在する大気平均温度を表し、気温の鉛直プロファイル観測によって得られた800m高度まで

の平均気温(27.9 $^{\circ}C$)を与えた. T_{sky} は、天空の放射輝度に相当する天空有効温度である. この T_{sky} は天頂角が約50 $^{\circ}$ のときの放射強度で換算される温度にほぼ等しいので(近藤 2000), ヘリコプター観測の前後に赤外カメラを天頂角約50 $^{\circ}$ の方向に向けて測定した放射温度(15.1 $^{\circ}C$)を用いた.

地表面温度をヘリコプターで水平移動しながら測定する際、その移動時間の経過に伴う温度変化が、観測者自身の移動に伴う温度変化の情報に加わる恐れがある. そこで、任意の時刻における地表面温度の分布を作成するとき、時間軸に対する線形内挿法によって地表面温度を推定することにした. 以下の計算式によって、あらかじめ観測範囲をメッシュ化(約200m)して平均した地表面温度 $T_s'(x, y)$ を時間補正する.

$$T_s = T_s' + \frac{T_2 - T_1}{\Delta t_L} \Delta t \quad (2)$$

ここで、 T_s は時間補正後の表面温度、 T_s' は時間補正前の表面温度、 Δt は補正時刻までの時間(秒)を表す. Δt_L は往路時と復路時の測定時間間隔(秒)、 T_1 と T_2 はそれぞれ往路時と復路時の表面温度である. 表面温度の時間変化量 $(T_2 - T_1) / \Delta t_L$ は、飛行の往路と復路で測定された同一区域の表面温度を用いて算出した. この区域には、アスファルト面が多く占める交差点、低層住宅街区、水田や裸地が多く占

める地域など、様々な土地被覆形態を有した4区域を選択した。その結果、各区域における表面温度の時間変化量は、観測経路の往復に要した約90分間で+4.2~+4.7℃と、区域の違いによる差も小さいことがわかったため、これらの平均値を使った $8.1 \times 10^{-4} \text{℃/秒}$ を、 $(T_2 - T_1) / \Delta t_L$ の数値として採用することにした。

2. 地上観測

ヘリコプター観測の実施にあわせ、岡山市街地を含む岡山平野内で定点型による地上気温の測定を実施した。測定地点は市街地を中心に東西約13km、南北13kmの地域とした(図3)。計39地点(3.7km²内に1地点の空間密度)に、公園のポールなどへ気温測定器を設置した。加えて、市街地内の商業街区と住宅街区で集中的に、気温測定を各8地点(0.12km²内に1地点の空間密度)で実施した(図3の(a)枠と(b)枠)。都市部と郊外で測定環境の条件をできる限り統一するため、天空率が0.5以上かつ地表面が裸地となった公園を選択した。魚眼レンズを装着した一眼レフカメラを用いて地表面上約2.5mの高さ(測定器の直上)で天空写真を撮影し、画像を全天写真解析プログラムCanopOn2で解析することで天空率を算出した。

気温の測定には、シェルター付きサーミスタ温度計(おんどとりJr. RTR-52; T&D社製)を使用した(図4)。データのサンプリング間隔は1分とし、解析にはその20分平均値を用いることにした。なお、測定器の精度を確認するため、観測実施前後に観測時と同様の気象条件ならびに恒温水槽条件下でそれぞれ、すべての温度計を検定した。その結果、測器間の器差はセンサ自体の誤差を含めても±0.2℃以内に収まっていることが確認された。

III. 観測結果と考察

1. 都市域の表面温度分布

ヘリコプター観測は8月5日と8月7日に実施したが、8月5日は残念ながら雲が多く最適な画像が得られなかった。一方の8月7日は幸運にも天候に

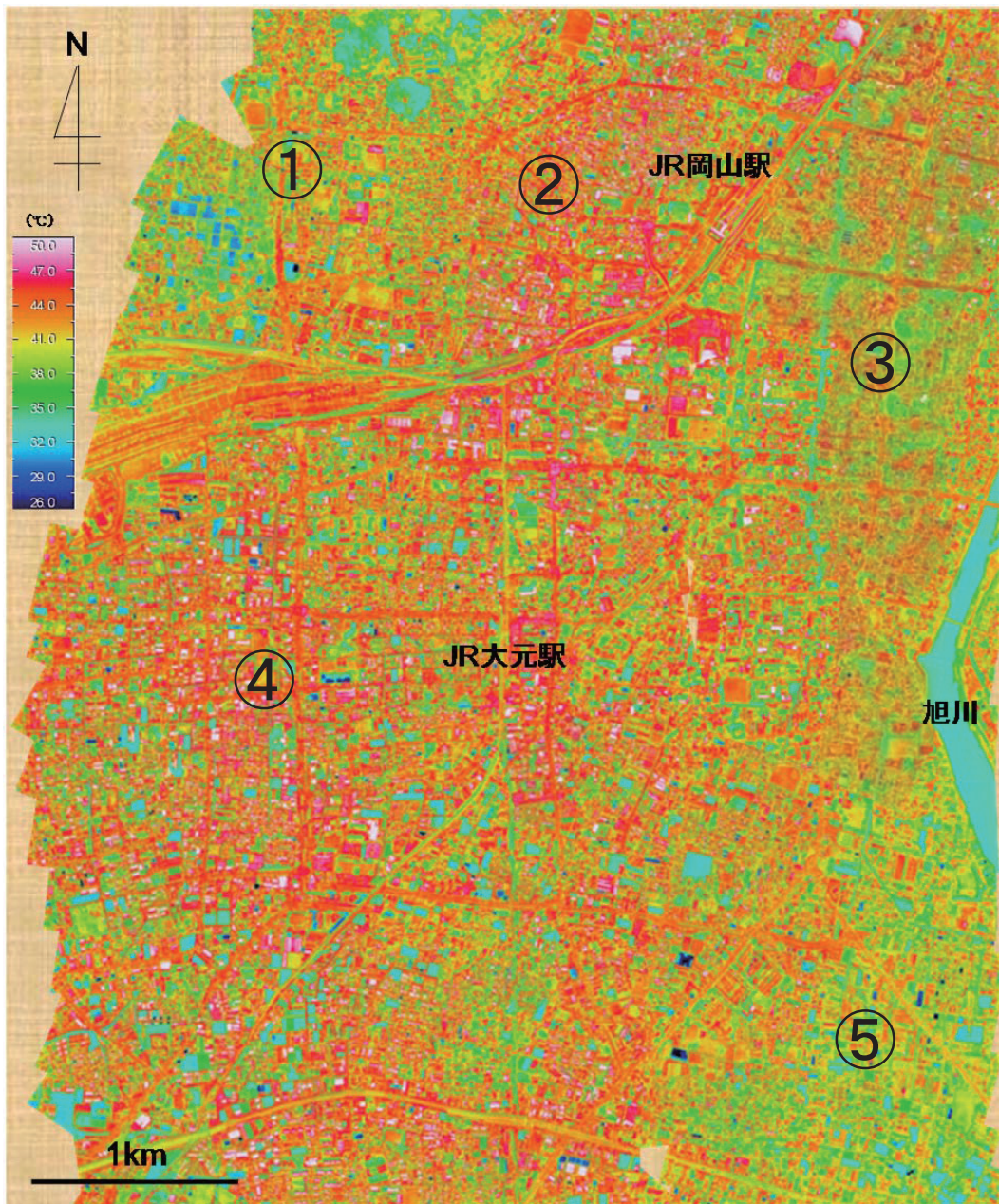


図4. 地上観測に使用した気温測定機器の様子。

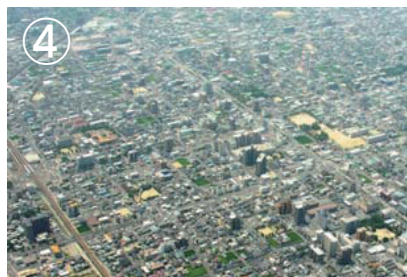
恵まれ、雲もほとんど存在せず鮮明な赤外面像を取得することができた。岡山地方気象台で観測された11~14時の日照時間の1時間値はいずれも1.0時間であり、最高気温も33.8℃を記録した。ここでは、その8月7日における正午推定の表面温度分布を、図5に示す。この図は、東西410m×南北310mの撮影範囲を時間補正した表面温度として1枚に接合させた画像である。

測定範囲内で表面温度が高かった地域は、JR岡山駅の西側(図中②付近; 北区奉還町, 富町, 寿町), JR大元駅の西側(図中④付近; 北区下中野, 上中野, 今)であった。これらの地域には戸建住宅やアパートなどの建築物が多く存在して自然地が少なく、表面温度は44~47℃を記録していた。反対に表面温度が低い地域はJR岡山駅の東側(図中③付近; 旭川まで至る一帯), 観測領域南東端(図中⑤付近; 北区十日市東町, 同中町, 南区豊成), 北区京山・大安寺一帯(図中①付近)で、35~38℃(図中の緑色)や32~35℃(図中の水色~黄緑)の表面温度が多く認められた。

②と④の地域で表面温度が特になくなっていった場所には、幹線道路や低層戸建住宅が多く含まれていた。おそらく、木造など熱容量の比較的小さな材質で建物は構成されていることが要因と考えられる。加えてこれらの地域では建物が低いため、道路に直達日射が入射しやすいことで路面温度も高くなりや



32~38°C



44~47°C



32~38°C

図5. 熱赤外カメラによって撮影された岡山市街地の表面温度分布(2008年8月7日正午推定値)と、画像中の③・④・⑤の地域で上空から撮影された写真及び表面温度値の代表範囲.

すい。一方、③は高層建築物が集中した地域で、岡山市では日中に最も人間活動が盛んな場所といえる。ここで表面温度が低いのは、おもにコンクリートで構成された建物の熱容量が大きいため温度が上昇しにくいことや、高層建築物によって路面や建物の表面で広く形成される日影の影響が考えられる。残りの①と⑤の地域では、畑や水田といった土壌や植生が多く存在することで表面温度が比較的低温になっている。

このように岡山市街地内では、晴天日の日中には表面温度の分布に大きな非一様性が認められた。表面温度の高かったJR岡山駅西側地域、JR大元駅西側地域では地物からの赤外放射量が大きいため、歩行者など屋外活動をしている人への放射熱負荷が大きいことも予想される。一方、JR岡山駅東側地域、観測領域の南東地域や北地域では反対に表面温度は前述の地域に比べて10℃ほど低く、放射熱の負荷もそれほど大きくないと考えられる。

2. 都市域の地上気温分布

8月7日のヘリコプター観測の実施中に測定された地上気温の水平分布を、図6に示す。午前10時30分から11時にかけて、すでに33℃を超える観測地点がみられる。この時間帯から11時30分の気温分布をみると、観測領域の南東付近で相対的に気温の低い観測地点が多く存在している(30~31℃)。内陸との気温勾配が大きい特徴から、おそらく瀬戸内海からの海風が徐々に侵入している影響と考えられる。12時から12時30分にかけては、市街地中心部の気温も33~34℃を記録する地点も増加し、13時には先述の南東地域との気温差が顕著にみられ、海風冷気の恩恵を受けていないようである。

表面温度でみられたJR岡山駅東側③の高温域は気温では認められず、JR岡山駅周辺とその南西部で高い地域が広がっていた。この地上気温を熱赤外カメラによって測定された表面温度と比較し、相関関係を調べてみた。地上気温の観測地点を中心とした10m・50m・100m・150m四方の格子を作成して、そのなかに含まれる表面温度の平均値を算出した。観

測地点を中心とする10m・50m・100m・150m格子における地上気温と表面温度の相関分析の結果を、図7に示す。いずれの場合も有意といえる相関が得られておらず、日中の気温分布に地表面温度が大きく影響している様子は認められない。図6で示された矩形枠内の表面温度観測範囲にある地上気温の観測値は、海風の冷却効果をあまり含んでおらず、図5の表面温度分布でみられた高温地域・低温地域とも対応しているようにはみえない。酒井(2013)は都市部の地上気温と地表面温度の分布が必ずしも一致しないことを指摘しており、本研究における観測の結果はそれを支持している。

3. 都市域の熱的な鉛直構造

ヘリコプター観測で得られた気温と気圧の鉛直データから、次式で定義される1000hPa面に気圧補正された温度である温位 θ を計算することで、大気境界層内の対流混合層の深さを推定した。

$$\theta = T \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{R_d}{c_p}} \quad (3)$$

T は気温(K)、 P は気圧(hPa)、 P_0 は基準気圧(1000hPa)、 R_d は乾燥空気に対する気体定数(=287J/kg・K)、 c_p は定圧比熱(=1006J/kg・K)を表す。その結果、豊成北公園から岡山大学にかけて、高度約800mまで等温位層の発達を確認できた。ヘリコプター観測の領域内で観測された表面温度の非一様性(図5)は最大で15℃程度みられたが、この温度差がどの程度の地表面からの顕熱輸送量の差に相当するか、ここで概算してみる。

地表面からの顕熱輸送量 H は、バルク近似法(近藤1994)を用いれば、

$$H = c_p \rho C_H U (T_s - T_a) \quad (4)$$

と表現される。ここで、 ρ は大気密度(kg/m³)、 C_H は顕熱に対するバルク輸送係数、 U は10m高度を基準とした地上風速(m/s)、 T_s は地表面温度(K)、 T_a は地表付近の気温(K)を示す。ここで、 $C_H U$ をあわせて顕熱輸送の交換速度(近藤 2000)と呼ぶ。この交換係数は土地被覆状態や大気安定度にも依存するが、

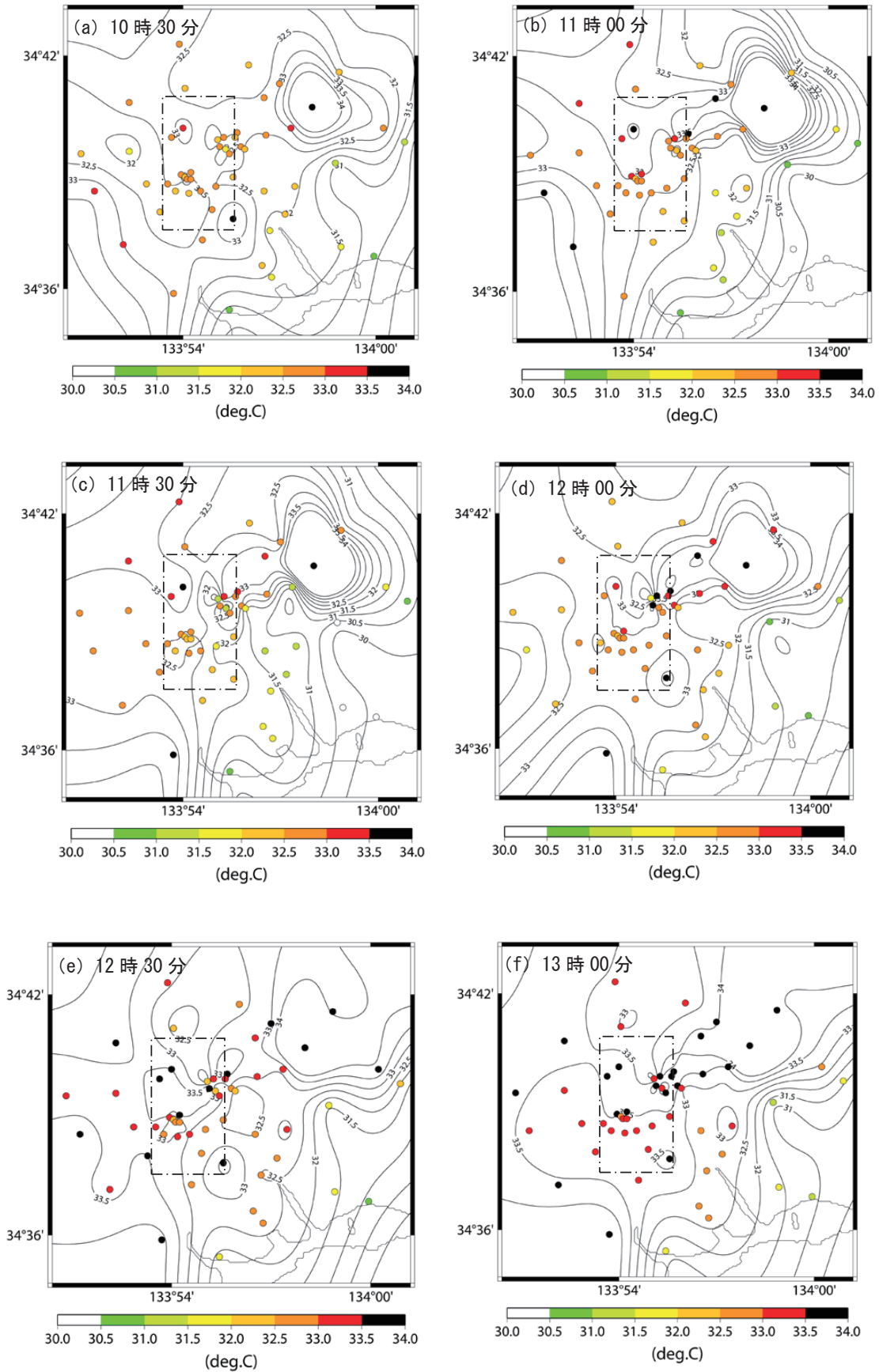


図6. ヘリコプター観測が実施された2008年8月7日における(a)午前10時30分・(b)午前11時・(c)午前11時30分・(d)12時・(e)12時30分・(f)13時における地上気温の水平分布. 一点鎖線の矩形領域は、ヘリコプター観測で表面温度が測定された領域(図2の青線内)を表す.

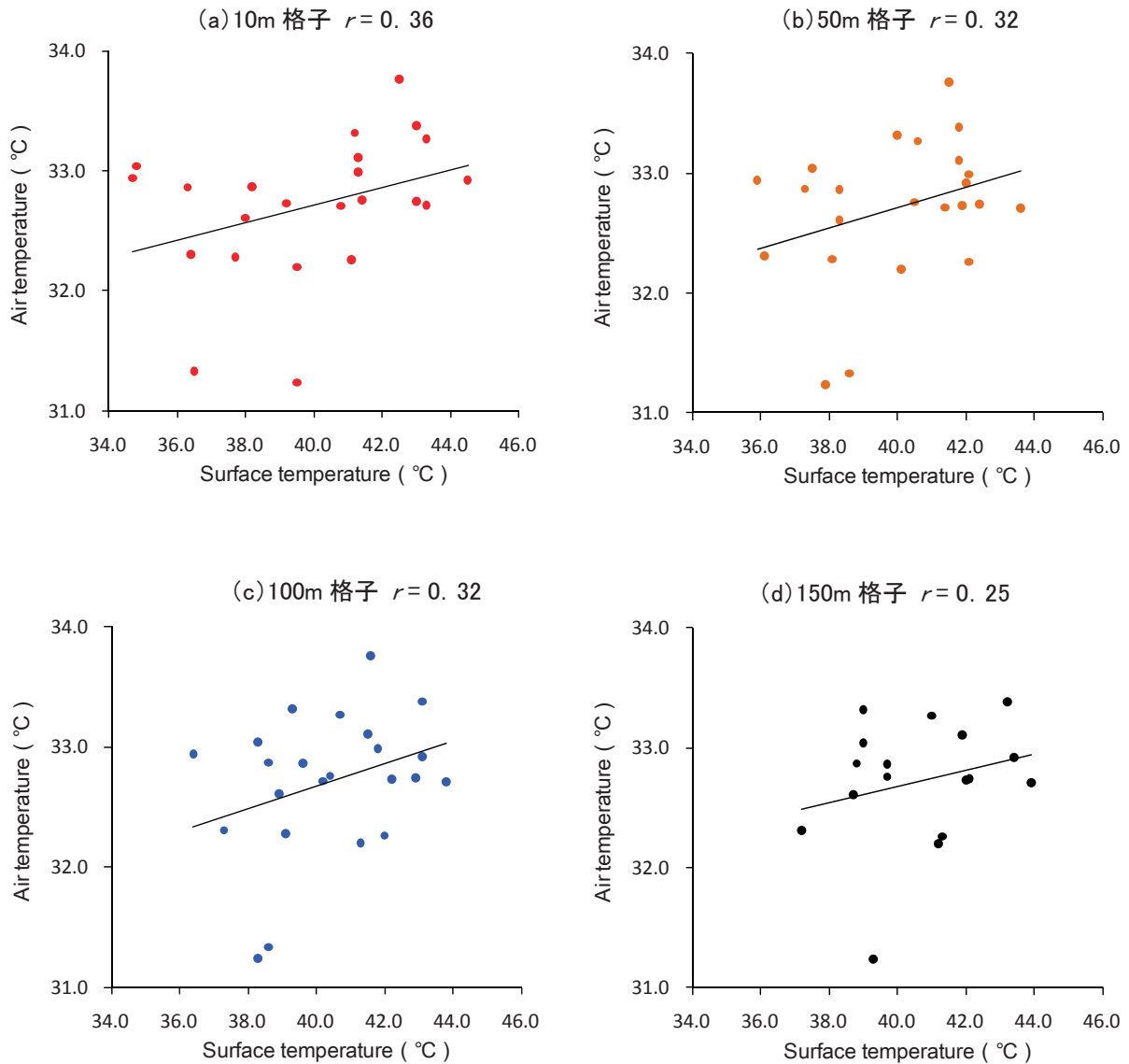


図7. 地上気温と表面温度の関係. (a)10m格子, (b)50m格子, (c)100m格子, (d)150m格子をそれぞれ示す. r は気温と表面温度の相関係数を示す. ヘリコプターによる表面温度観測の範囲内に存在した地上気温観測23地点の結果.

ここでは簡単化のため近藤(1992)を参考に, 0.001~0.01の値を持つと考える. 仮に大きな交換係数0.01のとき, 領域⑤では領域平均の地表面温度と気温を用いると H は 36W/m^2 , 領域②や④では 180W/m^2 が得られる. 先述の交換係数を含め, この数値には不確定な要素も含まれるが, ここで両者の顕熱輸送量の差 $\Delta H=144\text{W/m}^2$ が朝から線型的に増加していたと仮定する.

次に, 日中に発達する対流混合層の熱収支を考えると, 混合層内の加熱量の差 ΔQ は

$$\Delta Q = \int \Delta H dt \quad (5)$$

で表される. 一方で, 地表面温度に大きな差がみられた, 例えば領域②と⑤の地上温位の差 $\Delta\theta$ と混合層高度 h を用いて ΔQ を表せば,

$$\Delta Q = hc_p \rho \Delta\theta \quad (6)$$

となる. (5)式と(6)式のあいだで等号が成立するので, 結果として

$$\Delta\theta = \frac{\int \Delta H dt}{hc_p \rho} \quad (7)$$

が導き出される. ここから既述の値を代入していき(ΔH は朝6時からの時間積分として) $\Delta\theta$ を求めると,

約1.5℃が得られる。これは地表面温度差の1/10程度にすぎず、日中の対流混合層の発達に地上気温の形成に重要であることがわかる。逆に言えば、都市と郊外のあいだで生じる大きな表面温度の差が日中の地上気温に与える影響は、混合層の発達によって思ったよりも大きくならないといえる。また、図7で示されたように、地上気温と地表面温度の高低分布に良い対応はみられなかった。このことから混合層の鉛直対流だけに留まらず、局地風に伴う顕熱の水平移流の影響も無視できないことが考えられる。

IV. まとめ

2008年の夏季に、熱赤外カメラをヘリコプターに搭載して上空から岡山市街地を観測する機会を得て、晴天日の日中における都市域内の放射環境を撮影することができた。その結果、以下のような点が明らかとなった。

(1) 岡山市街地の約13km四方内でも、地表面温度に明瞭な非一様性が確認された。その最大温度差は10℃にも達していた。

(2) 岡山市街地内で地表面温度が高かった地域は、JR岡山駅西側地域(北区奉還町・富町・寿町)、JR大元駅西側地域(北区下中野・上中野・今)であった。これらの地域には戸建住宅やアパートなどの建築物が多く存在して自然地も少なく、表面温度は44～47℃を記録していた。反対に地表面温度が低かった地域はJR岡山駅東側(旭川まで至る一帯)、観測領域南東端地域の北区十日市東町・同区中町・南区豊成、そして北区京山・大安寺一帯で、32～38℃を示す表面温度が多く観測された。

(3) 同期して実施した地上気温の観測からは、日中に地表面温度が高い(低い)場所ほど地上気温も高くなる(低くなる)ような傾向は認められなかった。これは、簡単な大気境界層内の対流混合層モデルによる計算から、対流混合層の発達と海風など水平移流の熱的効果が地上気温に強く影響を及ぼすことに起因すると示唆された。ただし、瀬戸内海からの海風冷気の恩恵を岡山市街地では受けていないようであった。

(4)(3)の結果から、都市表面を高温化させない屋上・壁面緑化などのヒートアイランド対策は、日中の場合、気温を下げる目的よりも赤外放射を弱めて人体への放射熱負荷を小さくする目的として考えるべきである。

岡山市街地で上空から熱赤外面像が撮影され、その熱環境の実態が明らかになったのは、おそらく本研究が初めてである。政令指定都市へ移行した岡山市は今後も都市化が進展することが予想され、本研究の成果は将来の都市計画において重要な基礎資料となり得るであろう。

謝辞

本研究に多大なるご支援をいただきました、(財)八雲環境科学振興財団「平成20年度環境研究助成」に心より感謝申し上げます。本研究の遂行にあたり、終始ご支援とご配慮をいただきました四国航空(株)造田健蔵氏を始め、パイロット、関係皆様に厚くお礼申し上げます。地上気温の測器設置に関して御協力をいただきました岡山市公園緑地課に厚くお礼申し上げます。

引用文献

- Hicks, B. B., W. J. Callahan and M. A. Hoekzema (2010). On the heat islands of Washington, DC, and New York City, NY. *Bound.-Layer Meteor.*, 135-2, 291-300.
- 近藤純正(1992). 地表面温度と熱収支の周期解及びその応用. *農業気象* 48-3: 265-275.
- 近藤純正(2000). 地表面に近い大気の科学. 東京大学出版会. 324pp.
- 近藤淳正(1994). 水環境の気象学. 朝倉書店. 348pp.
- Lee H.-Y. (1993). An application of NOAA AVHRR thermal data to the study of urban heat island. *Atmos. Environ.*, 27B-1, 1-13.
- 森 牧人(1995). 熱画像式赤外線放射温度計の局地気象観測への応用について, 局地気象研究会講

- 演論文集 11. pp. 31-40.
- 鍋島美奈子・古崎靖朗・中尾正喜・西岡真稔(2006). 移動観測によるヒートアイランド現象の実測-大阪平野の夜間気温分布-. 日本ヒートアイランド学会論文集. 1: 23-29.
- Nichol, J. E. (1998). Visualisation of urban surface temperatures derived from satellite images. *Int. J. Remote Sens.*, 19-9, 1639-1649.
- 斎藤 武・谷口 博・園田 隆・田城徹雄・石田栄一(1977). 都市地表面温度分布の測定. 北海道大学工学部研究報告 84. 27-38.
- 酒井 敏(2013). 都市を冷やすフラクタル日除け. 成山堂書店. 182pp.
- 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*. 56-6. 443-454.
- Sugawara, H. (2001). Heat exchange between urban structures and the atmospheric boundary layer. The Tohoku University Doctoral Dissertation.
- 鈴木知道・玄地 裕・飯塚悦功・小宮山 宏(2001). 真夏の東京の気温日変化パターンの抽出-統計手法によるヒートアイランド現象の把握-. *天気*. 48-6. 383-391.
- 上田紘司・本條 毅・澤田大介・梅木 清・林 恩美(2004). ランドサットTMおよびETM+データを用いた都市緑地の表面温度の解析. *環境情報科学論文集*. 18. 259-264.
- Winkler, J. A., R. H. Skaggs and D. G. Baker (1981). Effect of temperature adjustments on the Minneapolis-St. Paul urban heat island. *J. Appl. Meteor.*, 20-11, 1295-1300.
- 巖 網林・三上岳彦(2004). ランドサット/TM熱画像による都市ヒートアイランド強度の試算と評価. *地學雑誌*. 113-4. 482-494.

要旨

2008年の夏季に、熱赤外カメラをヘリコプターに搭載して上空から岡山市街地を観測する機会を得て、晴天日の日中における都市域内の放射環境を撮影することができた。その結果、岡山市街地の13km四方内でも、地表面温度に明瞭な非一様性が確認され、その最大温度差は10℃に達していた。この観測からは、岡山市街地内の高温領域と低温領域をそれぞれ特定することができた。しかし、これに同期して実施した地上気温の観測では、日中に市街地の表面温度が高い(低い)場所ほど地上気温も高くなる(低くなる)ような傾向は認められなかった。このことから日中は、気温を下げる目的よりも都市表面からの赤外放射を弱めて人体への放射熱負荷を小さくする都市熱環境の改善策を検討するべきだといえる。

(2014年12月3日受理)