

# 熱画像データを用いた地表面温度と暑熱環境に関する分析

## Analysis of Land Surface Temperature and Hot Environment by using the Thermal Image Data

伊東 大悟\*<sup>1</sup> 森田 真一\*<sup>1</sup> 田中 勝哉\*<sup>1</sup> 後藤 圭二\*<sup>2</sup> 清水 桐郎\*<sup>2</sup> 三笹 晶子\*<sup>2</sup>  
Daigo Ito Shinichi Morita Katsuya Tanaka Keiji Goto Kirio Shimizu Akiko Misasa

\*<sup>1</sup> 株式会社パスコ PASCO Corporation

\*<sup>2</sup> 吹田市環境部 Department of Environment, Suita City (平成 23 年度当時)

Corresponding author: Daigo Ito, doatii5276@pasco.co.jp

### ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the actual situation of land surface temperature and is to analyze the hot environment. This research clarified the distribution of land surface temperature in Suita City by using a thermal infrared sensor mounted on an aircraft. By using the thermal image data, the effects of land use on the temperature was revealed quantitatively. We developed the model to explain the Grove temperature and WBGT (Wet-Bulb Glove Temperature) which is the index of hot environment. This model figured out the effects of solar radiation and land surface temperature on WBGT.

キーワード: 熱画像, 地表面温度, 土地利用, WBGT, 熱中症

**Key Words** : Thermal image, Land surface temperature, Land use, Wet-Bulb Glove Temperature, Heat stroke

### 1. はじめに

わが国は、都市化の進展に伴い、地表面がアスファルトやコンクリート等の人工被覆で覆われるようになり、大都市圏ではヒートアイランド現象が生じている。羽島ら<sup>(1)</sup>は、関東 1 都 6 県において、都市的土地利用への変化が気温上昇に影響をもたらしたことを明らかにしている。また、大都市圏では、人工被覆率と気温との間に相関性が認められることが統計的に明らかにされている<sup>(2)</sup>。近年では、地方都市においてもヒートアイランド現象が生じている事例が報告されている<sup>(3)(4)</sup>。

大阪管区気象台の観測データによると、大阪の気温はこの 30 年間で約 1.0℃上昇し、熱帯夜数は約 15 日増加した。都市化に伴う気温上昇は、生活環境の質を低下させるばかりではなく、最近注目される熱中症の発生リスクを高める要素となっている。2010 年の実績<sup>(5)(6)</sup>では、熱中症による死者数は 1,700 人を超え、救急搬送者は 50,000 人を上回った。このような背景から、熱中症対策を含め、ヒートアイランド対策の推進は喫緊の課題となっている。

2011 年度、環境省はヒートアイランド現象の抑制を図る緩和策と人体への熱ストレス等の軽減を図る適用策について整理し、ヒートアイランド対策マニュアル<sup>(7)</sup>をとりまとめた。ここに示された対策は、各自治体において推進されていくことが期待される。

吹田市では第 2 次環境基本計画(平成 21 年 3 月)の重点プロジェクトにヒートアイランド対策を位置づけ、取り組んでいるところである。そこで、今後対策を進めていくにあたり、地表面対策と熱中症対策に着目し、実態調査および対策効果に関する基礎的な分析を行うこととした<sup>注 1)</sup>。

地表面対策は表面温度の上昇を抑制し、大気中に移動する顕熱量を抑制する対策が求められる。大西ら<sup>(8)</sup>や澤田ら<sup>(9)</sup>は、衛星画像を用いて地表面温度と土地利用との関係性について分析し、緑化による熱環境緩和効果を明らかにした。また、田中ら<sup>(10)</sup>や佐川ら<sup>(11)</sup>、山下ら<sup>(12)</sup>は航空機搭載型熱赤外センサーで撮影した高解像度熱画像を用いて土地利用分類別の表面温度の特性について分析を行っている。地表面対策は屋根の高反射化や土地利用の改変等、さまざまな種類の対策が想定される。このため、地表面被覆の違いによる温度較差を詳細にとらえ、より多くの対策効果の定量的な評価が可能なモデルの構築が求められる。

一方、熱中症対策においては、被害の軽減に向けた早急な取り組みが求められる。熱中症予防の啓発は、現在多くの自治体で実施されており、熊谷市<sup>(13)</sup>や草津市<sup>(14)</sup>等では気象観測データをもとに熱中症の危険度を表す WBGT (Wet-Bulb Glove Temperature: 湿球黒球温度) をホームページや携帯電話に公開する等、先進的な取り組みが見られる。ここで WBGT とは、湿球温度、黒球温度、乾球温度から評価される指標であり、このうち黒球温度は日射や照り

返し等、人体が直接受ける輻射熱の強さを表す指標である。山田ら<sup>(15)</sup>や入船ら<sup>(16)</sup>は地表面状態の違いによって WBGT に較差が生じることや、地表面温度と WBGT との間に線形性が認められることを明らかにしている。また、村山ら<sup>(17)</sup>は、黒球温度計の熱収支モデルに気象観測データをあてはめ、地表面の状態の違いや風速等によって黒球温度に較差が生じることを明らかにしている。しかし、都市部の黒球温度の状況について分析した事例はほとんど見られない。

これらの背景を踏まえ、本研究では、実態調査として航空機搭載型熱赤外センサーを用いて吹田市域の地表面からの放射量を測定し、地表面温度への補正処理を行い、夏季の昼間と夜間の熱画像データを作成した。次に、地表面対策の基礎的な分析として、都市計画基礎調査データと熱画像データとの関係性を分析し、土地利用が地表面温度に与える影響を把握した。また、熱中症対策について、黒球温度に関する分析を行い、日射や地表面温度が黒球温度や WBGT に与える影響を把握するとともに、効果的な対策について考察を行った。

## 2. 熱画像データの作成

### 2.1 作成方法

地表面温度の実態を把握するため、航空機搭載型熱赤外センサー (AZM) を用いて海拔 2,400m の高度から 3m 解像度の熱画像を撮影した。撮影は 2011 年 8 月 10 日の夜間 (23:07~23:38) と 8 月 11 日の昼間 (12:00~12:30) に行った。当日の市内の気象条件は、吹田市北消防署の観測値によると最高気温が 33.9℃、最低気温が 27.1℃で快晴の真夏日であった。センサーの観測波長は、約 8~10 μm および約 10~13 μm の 2 種類のバンドを使用した。センサーの視野角は 80° で撮影コースの走査幅は約 4km である。このため、南北に 3 コースを設定し、コース間オーバーラップを 40% 確保して吹田市域を撮影した。

撮影した熱画像は、地表面から放射される赤外線強度が各ピクセルに DN 値 (Digital Number) として記録される。撮影時は撮影位置直下周辺の現地の 41 箇所、放射温度計を用いて地表面温度を測定し、現地観測結果と DN 値との関係性から DN 値を地表面温度に変換した。また、熱画像は撮影位置の中央部と両端でセンサーから地表面までの距離が異なるため、大気の影響による誤差が生じる。そのため、センサーの位置からの距離に基づく補正処理を行った。

### 2.2 熱画像データの補正処理

#### (1) 温度補正処理

あらゆる物体が出す放射量の大きさは、その物体の温度に依存することが知られており、ウィーンの変位則によると単位波長あたりの放射強度が最大となる波長  $\lambda_m$  (μm) は温度 T (K) に反比例し、式(1)で表わされる<sup>(18)</sup>。

$$\lambda_m = 2897 / T \quad (1)$$

T=300 (K) の場合、放射強度が最大となる波長は  $\lambda_m = 9.6$  (μm) である。このため、地表面温度の測定においては  $\lambda_m$  周辺の赤外放射が観測される。通常、放射温度計を用いた測定では、水蒸気の吸収量が少ない 8~13 μm 付近の放射量が用いられる。

航空機の測定では約 8~10 μm および約 10~13 μm のバンドを観測した。地表面温度の測定にあたっては 8~13 μm 付近の放射量をとらえる必要があることから 2 種類の DN 値を用いることとした。表 1(a)は DN 値と地表面温度との関係式(2)を、重回帰分析を用いて推定した結果を表しており、昼間、夜間ともに決定係数の高い結果が得られた。図 1 は、地表面温度の実測値と式(2)から得られた推計値との誤差分布を示している。この結果、熱画像は昼間で ±6℃、夜間で ±2℃程度の誤差を有すると考えられる。

$$T_s = a_1 x_1 + a_2 x_2 + c \quad (2)$$

$a, c$  : 係数

$T_s$  : 地表面温度 (°C)

$x_1$  : DN 値 (約 8~10 μm)     $x_2$  : DN 値 (約 10~13 μm)

表 1 DN 値を用いた地表面温度の推計式

(a)2 変数の DN 値を用いた推計式

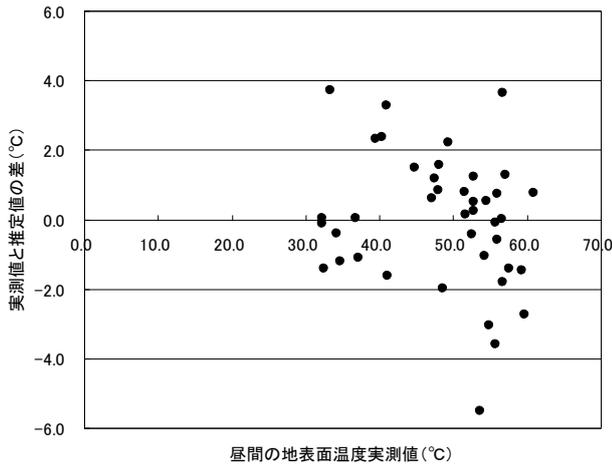
変数 x	係数 a	
	昼間	夜間
DN 値 (約 8~10 μm)	$7.59 \times 10^{-4}$	$2.97 \times 10^{-3}$
DN 値 (約 10~13 μm)	$6.08 \times 10^{-3}$	$5.03 \times 10^{-3}$
定数項 c	-108.64	-128.91
決定係数 R <sup>2</sup>	0.953	0.893
サンプル数	41	41

(b)1 変数の DN 値を用いた推計式

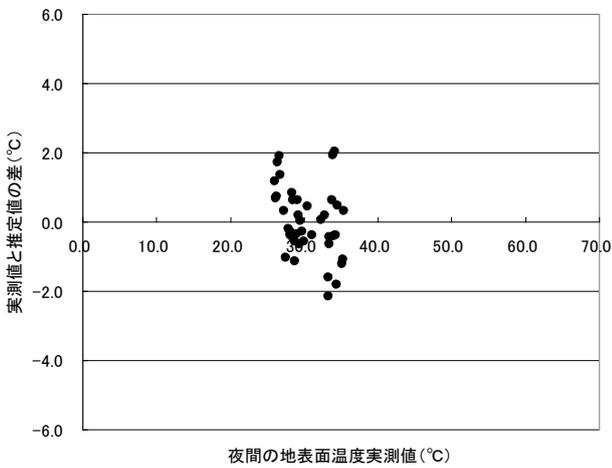
変数 x	係数 a	
	昼間	夜間
DN 値 (約 10~13 μm)	$6.92 \times 10^{-3}$	$8.22 \times 10^{-3}$
定数項 c	-108.25	-126.45
決定係数 R <sup>2</sup>	0.953	0.875
サンプル数	41	41

表 1(b)は地表面温度の説明力が高い約 10~13 μm の DN 値のみを用いて回帰分析を行った結果を示しているが、誤差分布は図 1 とほぼ同等の結果を得た。表 1(a)の推計式は変数間の相関が高い多重共線性の問題が生じる可能性が考えられるが、推計値としては表 1(b)の推計式とほぼ同等の結果が得られたため、妥当であると判断した。

ただし、熱画像の撮影においては、放射率を一定と仮定し、表面材質ごとの補正を行っていない。このため、放射率が約 0.9~1.0 のアスファルトやコンクリート、裸地、草地、水面等は場所によって微小の誤差を伴う。また、金属等の特殊な素材で覆われた箇所では十分な測定結果が得られない場合も考えられる。しかし、作成した熱画像は上記のような誤差を含むものの、建物の屋根や周辺の裸地、草地、道路等の相対的な温度較差を十分把握することが可能であり、ヒートアイランド対策の検討に役立つことができると考える。



(a) 昼間熱画像の誤差分布



(b) 夜間熱画像の誤差分布

図1 地表面温度の補正值と実測値の誤差分布

## (2) 撮影コース間の補正処理

熱赤外センサーの視野角によって生じる温度較差や撮影時間差によって撮影コース間に生じる温度較差の補正処理を行った。

補正処理は、図3に示すように撮影位置を含む240m間隔の直線を設定し、直線上の熱画像の画素をサンプリングして平均値を算定した。次に、図2に示すように、撮影位置から左右方向の距離と240m間隔に得られた熱画像の平均値との関係を2次曲線式(3)で近似した。その後、撮影位置中央の温度から乖離した分の補正量を、式(4)を用いてピクセル単位に算出した。また、コース全体に生じた較差は、式(3)のy切片cの3コースの平均値を $\hat{y}$ とし、 $\hat{y}$ と各コースのy切片cとの差分を式(5)で補正した。最終的に補正式は式(6)で表わされるが、その推計結果は表2に示すとおりである。直線上のサンプル数は2,260程度であり、様々な種類の地物の温度が各直線上に均等に含まれると仮定した。ただし、各直線の平均値に大きな影響を与える大規模な緑地や河川の部分はサンプルから除外した。

$$y = ax^2 + bx + c \quad (3)$$

$$\Delta y_1 = c - y = -ax^2 - bx \quad (4)$$

$$\Delta y_2 = \hat{y} - c \quad (5)$$

$$y' = y + \Delta y_1 + \Delta y_2 = y - ax^2 - bx - c + \hat{y} \quad (6)$$

a, b, c : 係数

x : 撮影位置に対する座標 (m) (西側を - 東側を +)

y : 地表面温度 (°C)

$\Delta y_1$  : センサー視野角による補正量 (°C)

$\Delta y_2$  : 各コース間の補正量 (°C)

$\hat{y}$  : 近似式(1)のy切片cの全コースの平均 (°C)

y' : 補正後の地表面温度 (°C)

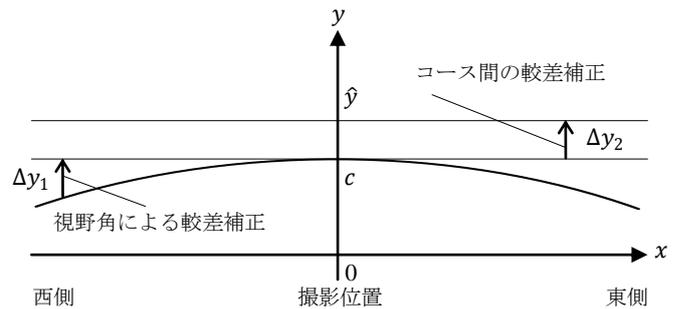


図2 撮影コースの補正処理のイメージ

表2 撮影コース別の補正式とコース間補正量

(a)昼間の補正式

コース番号	a	b	c	$\Delta y_2$
Course1 $R^2=0.91$	$-2.74 \times 10^{-6}$	$-3.76 \times 10^{-4}$	50.168	-0.4176
Course2 $R^2=0.92$	$-2.84 \times 10^{-6}$	$3.10 \times 10^{-4}$	50.714	-0.9253
Course3 $R^2=0.94$	$-2.05 \times 10^{-6}$	$-9.11 \times 10^{-6}$	48.408	1.3429

(b)夜間の補正式

コース番号	a	b	c	$\Delta y_2$
Course1 $R^2=0.86$	$-6.79 \times 10^{-7}$	$8.06 \times 10^{-5}$	29.619	0.2841
Course2 $R^2=0.89$	$-7.35 \times 10^{-7}$	$1.31 \times 10^{-4}$	28.290	0.0226
Course3 $R^2=0.96$	$-8.69 \times 10^{-7}$	$-3.10 \times 10^{-5}$	29.028	-0.3066

$R^2$ は式(2)の決定係数

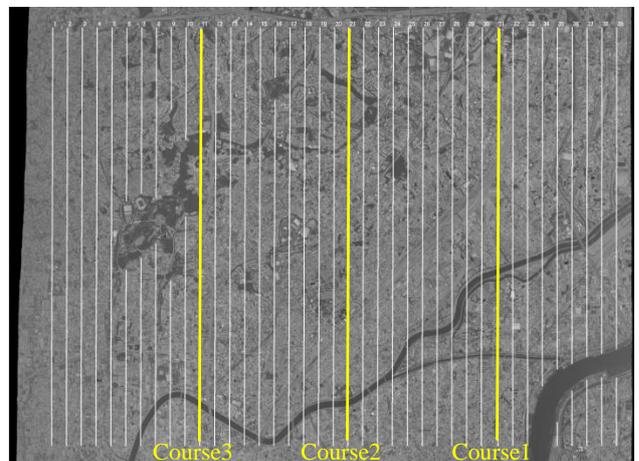


図3 サンプリングの直線 (Course1~3は撮影位置)

### 2.3 昼間と夜間の熱画像データと地表面温度分布の特徴

図4は、補正処理を行って作成した熱画像を示している。昼間は全体的に緑被率が大きい北部の地表面温度が低く、緑被率が小さく建物が多い南部の地表面温度が高い傾向が見られた。また、夜間は道路等のアスファルト面の地表面温度が相対的に高くなる特徴が見られた。その他、市北部の万博公園周辺の大規模な屋外駐車場は、昼間に多くの日射量を受けることから昼夜間ともに地表面温度が高くなる特徴が見られた。地表面温度が特に高くなる場所としては人工芝運動場もあげられ、70℃前後まで温度が上昇していたことが分かった。

ここで道路に着目すると、昼間は広幅員の道路や東西方向の道路の温度が高くなる傾向が見られ、夜間は交差点の温度が高くなる特徴が認められた。これは朝から夕方にかけて日陰等の影響が少なく、アスファルトの蓄熱量が増加したことが理由の一つとして考えられる。また、建物の屋根に着目すると、材質の特性によって昼間は戸建て住宅の屋根の温度が高くなる傾向があり、夜間は非木造系の建物の屋根の温度が高く維持される傾向が見られた。

## 3. 地表面温度に関する分析

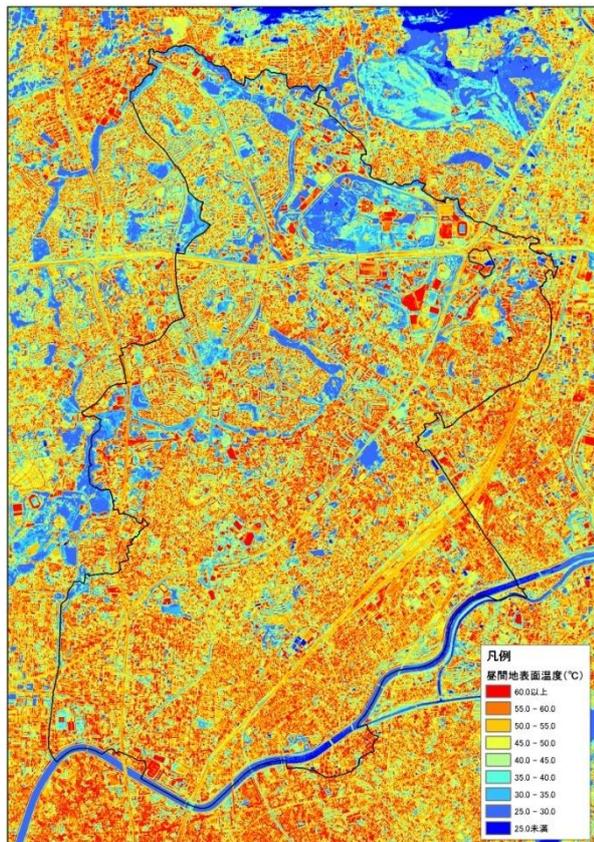
### 3.1 分析方法

地表面温度の特徴をより具体的に明らかにするため、土

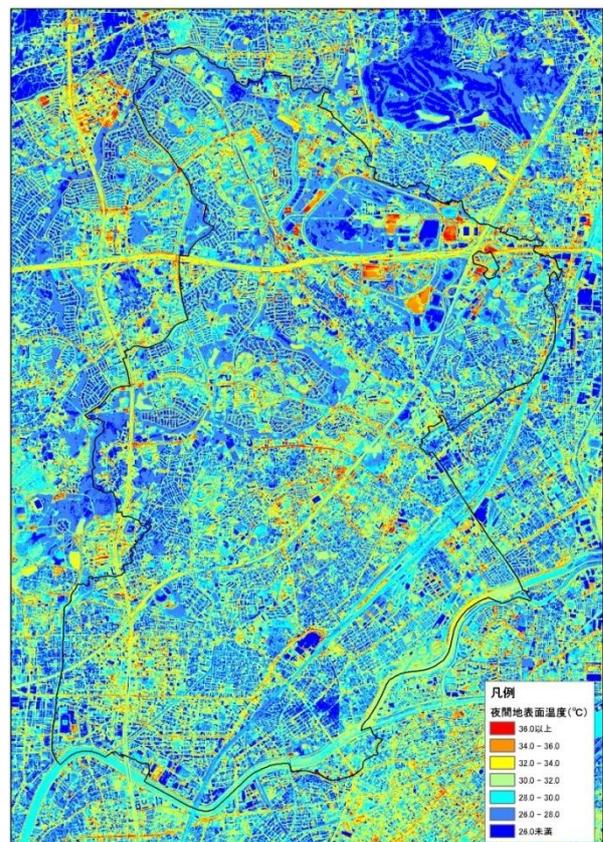
地利用が地表面温度に与える影響を分析した。分析手法としては、地表面温度と土地利用のメッシュデータを用いて重回帰分析を適用した。メッシュデータを用いることによって、熱負荷の程度や対策効果の評価を同一区画単位で定量的に行い、相対的な比較を行って、対策が必要な地域の把握や効果的な対策の検討を行えるようにした。メッシュサイズは熱負荷の地域的な比較や建物・敷地に対する対策効果の検証等を行う目的から100mとした。

はじめに、昼間と夜間の地表面温度をメッシュ単位で集計し、メッシュ平均地表面温度データを作成した。次に、都市計画基礎調査の土地利用現況データ(平成22年度)と建物用途現況データ(平成21年度)を重ね合わせて、データが互いに重ならないように処理を行い、土地利用データを作成した。データはメッシュ単位で合計面積を集計して土地利用メッシュデータを作成した。

土地利用現況データは20種類前後の土地利用区分が調査されたものであるが、熱環境分析に使用する目的から、調査区分を表3のように統合・整理した。一方、建物用途現況データは40種類前後の建物用途区分が建物形状データごとに調査されたものであるが、屋根の材質や特性を考慮し、戸建と戸建て以外の建物の2区分に整理した。また、緑地や街路樹等の緑被は、吹田市緑被率調査成果(平成16年4月)を使用し、土地利用データの緑地と重ならない部分の緑被データを作成した。



(a)昼間の熱画像



(b)夜間の熱画像

図4 夏季の地表面温度の熱画像

表3 土地利用現況データの調査区分の統合・整理

土地利用現況区分	統合・整理した調査区分
道路	道路（幅員の細い道路は地形図より作成）
鉄軌道敷	鉄道敷
公共施設	宅地 (都市計画基礎調査の建物用途現況図の 建物形状と重なる部分を削除)
官公署	
一般市街地	
商業業務地	
工場地	
畑	
田・休耕地	緑地
公園・緑地	
山林	
水面	
学校	学校・空地
その他空き地	
運動場・遊園地	運動場・遊園地
社寺敷地、公開庭園	—（未作成）
墓地	
低湿地・荒蕪地	
集落地	
原野・牧野	—（該当なし）

大規模駐車場・人工芝データは地形図（平成20年）より作成した

### 3.2 重回帰分析の結果

表4は重回帰分析の結果を示している。係数の信頼度を示すt値はすべて1%有意水準を満足した。変数間の相関係数は絶対値で0.4以下であり、多重共線性は生じていない。この結果、メッシュ平均地表面温度の相対的な較差に与える影響は土地利用によって十分説明ができると考えられる。

表4 メッシュ平均地表面温度の重回帰分析結果

変数 x	係数 a <sub>i</sub> ( )内は t 値	
	昼間	夜間
緑地	-0.00115010 (-16.63)	-0.00024038 (-18.81)
緑被 (緑地除く)	-0.00123242 (-32.21)	-0.00024696 (-20.14)
水面	-0.00175010 (-17.69)	0.00016528 (6.85)
戸建	0.00106178 (13.66)	-0.00052474 (-28.99)
戸建以外 の建物	0.00071070 (8.53)	-0.00009442 (-4.73)
道路	0.00032848 (4.20)	0.00032068 (20.35)
鉄道敷	0.00057733 (7.38)	-0.00006641 (-3.94)
宅地	0.00037664 (5.39)	0.00007285 (6.20)
学校 ・空地	0.00031933 (4.46)	0.00006049 (4.70)
大規模駐車場 ・人工芝	0.00149636 (16.96)	0.00037560 (15.75)
運動場 ・遊園地	0.00029302 (3.85)	—
定数項 c	47.7338524 (66.39)	29.8803883 (238.25)
決定係数 R <sup>2</sup>	0.755	0.534
サンプル数	3227	3227

推計式:  $T_s = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_{11}x_{11} + c$

夜間について運動場・遊園地はt値が有意ではないため除外した。

表5 土地利用面積が1,000m<sup>2</sup>増加した場合の寄与度

土地利用	昼間 (°C)	夜間 (°C)
緑地	-1.150	-0.240
緑被 (緑地除く)	-1.232	-0.247
水面	-1.750	0.165
戸建	1.062	-0.525
戸建以外の建物	0.711	-0.094
道路	0.328	0.321
鉄道敷	0.577	-0.066
宅地	0.377	0.073
学校・空地	0.319	0.060
大規模駐車場・人工芝	1.496	0.376
運動場・遊園地	0.293	—

表5は土地利用が1,000m<sup>2</sup>増加した場合の寄与度を表している。この結果、緑地や緑被は昼夜間ともに地表面温度を下げる効果があり、地表面対策として緑化は有効であることが認められた。また、水面は昼間の地表面温度を下げる効果が高いことが明らかとなった。さらに、戸建の屋根は昼間熱せられ地表面温度を上げる効果があるが、夜間は冷めやすく地表面温度を下げる方向に働くことが分かった。道路は昼夜間ともに地表面温度を上げる要素といえるが、寄与度の割合から、夜間の熱環境を改善する視点においてはアスファルトの対策が重要になると考えられる。局所的に見ると、大規模駐車場・人工芝は地表面温度を上げる効果が高い。この理由としては、大規模駐車場が一日を通して日射量を多く受けることや、アスファルトの蓄熱性が高いこと等が考えられる。人工芝は昼間に70°C前後まで上昇する特性があることから、このような熱環境の厳しい場所では、熱中症も含めた対策が重要であると考えられる。

## 4. 黒球温度に関する分析

### 4.1 黒球温度

熱中症予防の対策にあたっては、屋外の暑熱環境指標として式(7)で定義されるWBGTが用いられる。この指標は、ISO7243やJIS Z 8504で規格化されており、現場作業や運動時の熱ストレスを評価する有用な指標として用いられている。本研究では、都市部におけるWBGTの分布を把握するにあたって、黒球温度に着目し、観測時の条件と黒球温度との関係性について分析を行った。

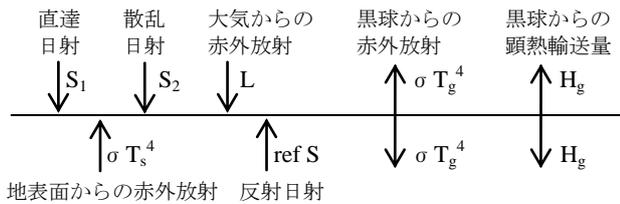
$$WBGT = 0.7 \times T_w + 0.2 \times T_g + 0.1 \times T_a \quad (7)$$

$T_w$ : 湿球温度

$T_g$ : 黒球温度

$T_a$ : 乾球温度

ここで、黒球温度は日射や地表面等からの放射熱の強さを表わす指標である。黒球温度計の表面の熱収支は、黒球を水平の平板に置き換えると図5に示すモデルで表わされる<sup>(17)</sup>。



※矢印は放射あるいは熱輸送の方向を表す  
 $\sigma$  : ステンファン・ボルツマン定数  
 ref : アルベド

図5 黒球温度計表面の熱収支

これによると、黒球温度は理論上、直達日射、散乱日射、大気からの赤外放射、地表面からの赤外放射、反射日射、黒球からの顕熱輸送量によって決定される。このうち、直達日射  $S_1$  は建物等の陰によって大きく変化する。また、散乱日射  $S_2$  や大気からの赤外放射  $L$  は天空率に比例することが知られている<sup>(19)</sup>。さらに、黒球からの顕熱輸送量  $H_g$  は風の状況によって変化する特性がある<sup>(17)</sup>。これらの事象を踏まえ、黒球温度に影響すると考えられる日射や天空率、地表面温度、風等の条件を現地で観測し、黒球温度との関係性について分析を行った。

#### 4.2 分析方法

はじめに、黒球温度、地表面温度、天空率、風の有無、直達日射の有無について現地観測を行った。観測は、ハンディタイプの黒球温度計と放射温度計を用いて計測を行った。観測地点では魚眼レンズ（フィッシュアイコンバーターFC-E8, Nikon）を装着したデジタルカメラを用いて全天写真を撮影した。レンズの射影方式は等距離射影方式で、撮影した全天写真は CanopOn2<sup>(20)</sup>を用いて解析し、天空率を算出した。また、風の有無、直達日射の有無は目視または体感によって確認した。観測場所はオフィスビルや集合住宅が多い江坂地区周辺と低層住宅地が広がり周囲に緑地が多い藤白台地区の2地区を設定し計48地点の観測値を得た。観測日は熱画像を撮影した日の気象条件に近い2011年8月17日で最高気温は33.9℃、最低気温は28.6℃であった。観測は日中の気温が高くなる12:00~15:00の時間帯に徒歩で移動して実施した。観測中、黒球温度は同一条件下（日向、無風）で最大6℃程度の変化が見られたが、観測値の時点補正は行わなかった。

次に、観測結果に重回帰分析を適用し、地表面温度、天空率、風の有無が黒球温度に与える影響を把握した。ここで、直達日射は黒球温度に与える影響が大きいと想定されることから、直達日射の有無別で分析を行ったほか、直達日射の有無をダミー変数で考慮して分析を行った。

#### 4.3 現地観測結果

図6は、黒球温度の現地観測結果を観測時の雲や風、陰の状況別に並び変えて整理したものである。この結果、日

向の黒球温度は50℃前後であるのに対し、雲や建物で日射が遮られると40℃前後まで低下し、直達日射の有無によって黒球温度には10℃前後の変化が生じていたことが分かった。また、雲や陰の影響がない日向で風がある条件下では黒球温度が5℃前後低下する結果となった。これは、図5に示したように、風によって黒球からの顕熱輸送量が増加し、黒球温度が低下した影響と考えられる。風の有無による影響は日陰の観測地点においても認められた。観測結果は、高層建物が多い江坂地区と低層住宅が広がる藤白台地区の値が混在しているが、地域特性による違いは特に見られなかった。

図7は現地観測を行った地表面温度と昼間の熱画像データの地表面温度との関係を表している。相関係数は0.837と高く、両者は最大で±6.6℃程度の誤差であった。このことから、現地観測を行った8月17日の地表面温度は熱画像を撮影した8月11日の地表面温度に近い値であったといえる。

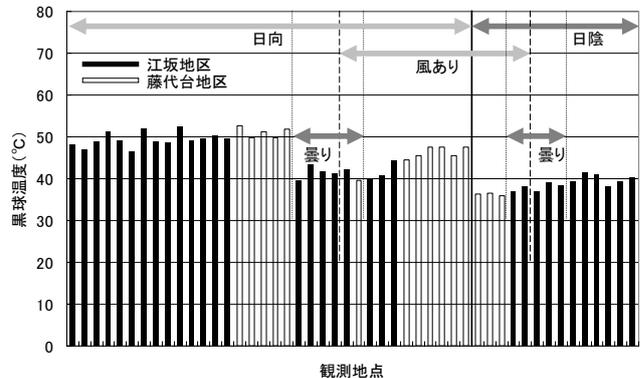


図6 黒球温度の観測結果と観測条件

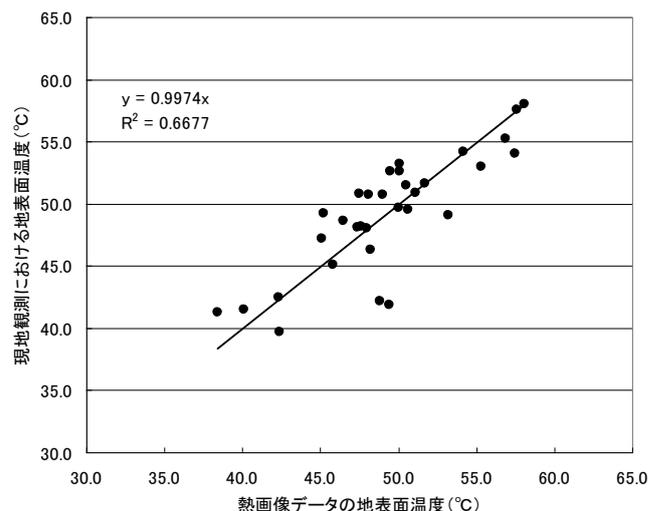


図7 現地観測の地表面温度と熱画像の地表面温度の関係

#### 4.4 黒球温度の推計

##### (1) 直達日射の有無別の重回帰分析結果

表6は、現地観測した地表面温度と天空率、風の有無を用いて黒球温度を推計した結果を示している。推計は直達

日射の有無別に行い、風の有無はダミー変数（あり：1，なし：0）を用いて考慮した。

この結果、直達日射ありの地表面温度の係数には有意性が認められなかったが、その他の係数は10%または5%有意水準を満足した。直達日射がある状態では、黒球温度は日射の影響を強く受けることから、地表面温度が黒球温度に与える影響を十分評価できなかったものと考えられる。日向の地表面温度が黒球温度に与える影響を正確に把握するためには、観測時に黒球に直接日射が当たらないようにする等の工夫が必要であり、今後の課題と考える。

推計結果からは、天空率の10%の低減は黒球温度を0.4℃～1.0℃程度低減させ、風は2.3℃～4.5℃程度低減させる効果があることが分かった。また、直達日射がない状態では、地表面温度の10%の低減は黒球温度を1.8℃程度低減させる効果があると推計された。

表6 直達日射の有無別の重回帰分析結果

変数 x	係数 a, ()内は t 値	
	直達日射あり	直達日射なし
地表面温度	0.06622 (0.87)	0.17635** (3.12)
天空率	0.10045** (3.55)	0.04058* (1.87)
風ダミー	-4.52184** (-6.46)	-2.35361** (-4.28)
定数項 c	42.0554** (10.54)	31.7295** (16.21)
決定係数 R <sup>2</sup>	0.697	0.751
サンプル数	27	21

推計式： $T_g = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + c$ , \*10%有意, \*\*5%有意

#### (2) 全サンプルを対象とした重回帰分析結果

表7は観測結果の全サンプルを用いて式(8)をもとに黒球温度を推計した結果を示している。直達日射の有無はダミー変数を用いて考慮した。

この結果、すべての係数は5%有意水準を満足し、決定係数の高い推計式が得られた。説明変数間の相関係数は地表面温度と直達日射ダミーで0.73と高いが、分散拡大係数VIFは10未満であり、多重共線性は生じていない。各変数の影響度は表6と比較すると、直達日射がある場合とない場合の平均的な値として推計されたことが分かる。黒球温度に与える影響は直達日射による影響が最も大きく、影の創出等によって6.9℃程度の低減効果があることが明らかとなった。

地表面温度の分布状況が既知である場合は、式(8)を用いると黒球温度の平面的な分布を推計することができる。ただし、この推計式は最高気温が33.9℃であった8月17日の気象条件下において推定したモデルである。

$$T_g = a_1T_s + a_2R_s + a_3\lambda_U + a_4\lambda_R + c \quad (8)$$

a, c: 係数

T<sub>s</sub>: 地表面温度 (°C)

R<sub>s</sub>: 天空率 (%)

λ<sub>U</sub>: 風ダミー変数 (あり:1, なし:0)

λ<sub>R</sub>: 直達日射ダミー変数 (あり:1, なし:0)

表7 全サンプルの重回帰分析結果

変数	係数 a	標準偏回帰係数	t 値
地表面温度	0.123	0.162	2.48
天空率	0.066	0.185	3.54
風ダミー	-3.326	-0.297	-6.95
直達日射ダミー	6.898	0.658	10.37
定数項 c	33.445	—	17.26
決定係数 R <sup>2</sup>	0.922		
サンプル数	21		

#### 4.5 WBGT の推計と地表面温度の影響評価

都市部における WBGT の平面的な分布を把握するため、熱画像から得られた地表面温度を式(8)に代入し、式(7)を用いて WBGT を推計した。ここで、天空率は現地観測結果の平均値 37.19%で一律とし、風がなく直達日射がある状態を仮定した。また、前提条件として、乾球温度と湿球温度はそれぞれ熱画像の撮影時の気象条件である 33.9℃、22.5℃とした。図8は吹田市の南西部における推計結果であり、赤色に近い場所である程 WBGT の値が相対的に高く熱中症の危険度が高いことを表している。ここで、建物の屋根は歩行空間ではないことから黒色の表現とした。表8はそれぞれの場所において式(7)、(8)を用いて推計した WBGT の値である。また、表9は地表面温度の変化が WBGT と黒球温度に与える影響を示している。

この結果、人工芝や道路、学校の運動場では WBGT の値が相対的に高く、日本体育協会の熱中症予防のための運動指針によると運動中止の基準に該当した。一方、公園等の緑被地では WBGT が相対的に低い値となった。また、日陰の場所の WBGT は日向の場所と比較して1.4℃以上低い値として推計された。このことから、公園等の緑被地の活用や日陰の創出は熱中症の対策として効果があることが認められた。さらに、地表面温度を10℃下げる対策を行った場合は、WBGT を0.25℃低減させる効果があると推計された。

表8 WBGT の推計結果

場所	推計値 (°C)
人工芝	31.6 (運動中止)
道路 (アスファルト面)	日向 31.2 (運動中止)
	日陰 29.2 (嚴重警戒)
学校の運動場	31.0 (運動中止)
公園 (緑被地・芝生)	日向 30.6 (嚴重警戒)
	日陰 29.2 (嚴重警戒)
田畑	30.4 (嚴重警戒)

( )内は日本体育協会の熱中症予防のための運動指針

日陰は直達日射ダミー変数を0として推計した値

表9 地表面温度の変化が WBGT と黒球温度に与える影響

地表面温度の低減 (°C)	WBGT の低減 (°C)	黒球温度の低減 (°C)
-1.0	-0.02	-0.12
-5.0	-0.12	-0.62
-10.0	-0.25	-1.23
-15.0	-0.37	-1.85
-20.0	-0.49	-2.47

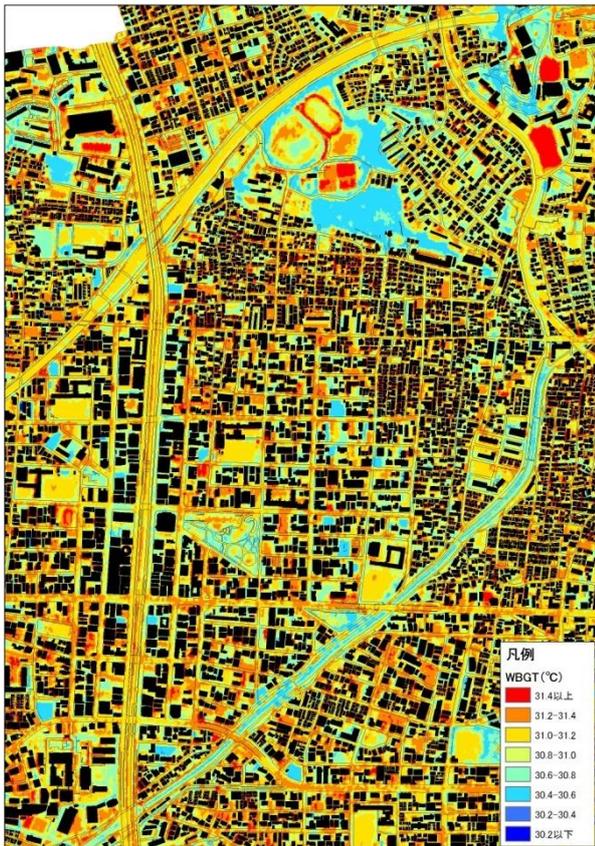


図8 WBGTの推計値の分布

表10 WBGTの推計条件

項目	条件
乾球温度	33.9°C
湿球温度	22.5°C
天空率	37.19%
直達日射	あり
風	なし

図8は熱中症の危険度を色別に表示したWBGTの分布の推計値を表しているが、表10に示すように天空率が一定で日陰のない状態を想定する等さまざまな仮定を行っている。実際は場所によって建物等の陰が生じており、天空率も異なることから、凡例の上限と下限の幅は現状よりも広がるものと考えられる。天空率や日陰の状況は、建物形状データ等を活用するとGIS（地理情報システム）を用いて計算できる要素であることから、より現実的なWBGTの推計が可能である。また、図上の青色の場所はWBGTが相対的に小さいが、必ずしも安全な場所とは限らないことから、表現の仕方については今後の検討課題といえる。

しかし、このような熱中症の危険度を表したマップを市民に配布することは、日常生活空間における危険性を把握することができ、日々の暮らしの中で熱中症を意識することにつながるため、予防対策としては効果があると考えられる。

## 5. おわりに

本研究は、航空機搭載型熱赤外センサーを用いて吹田地域の夏季の熱画像を撮影し、地表面温度の実態を明らかにした。次に、作成した熱画像データを用いて、土地利用が地表面温度に与える影響について分析を行った。また、暑熱環境を表す黒球温度と日射や地表面温度との関係性について分析を行い、都市部におけるWBGTの分布を平面的に推計した。これらの分析から得られた結果は、以下のとおりである。

- ・地表面温度の熱画像データを作成した結果、昼間は人工芝や屋外駐車場、戸建住宅の屋根の温度が相対的に高くなる傾向を明らかにした。また、夜間は道路や屋外駐車場等のアスファルト面が高い温度を維持していることを明らかにした。
- ・土地利用が100mメッシュの平均地表面温度に与える影響を分析した結果、昼間の地表面温度を下げる対策としては、緑化や水面の創出による効果が大きく、次に戸建住宅の屋根対策の効果が大きいことが分かった。また、局所的には大規模駐車場や人工芝等の対策の効果が大きいことを明らかにした。一方、夜間の地表面温度の低減にあたっては、道路対策の効果が大きく、次に緑化による効果が大きいことを明らかにした。
- ・地表面温度がWBGTに与える影響を分析した結果、10°C～20°Cの地表面温度の低減に対してWBGTは0.25°C～0.49°Cの低減が見込まれ、地表面温度の低減は熱中症対策に効果があることを明らかにした。また、日陰の形成は、WBGTを1.4°C以上低減させる効果があり、歩行空間における熱中症対策としては日陰の活用や創出が最も効果的であることが分かった。
- ・地表面温度の熱画像データを用いて黒球温度を推計し、WBGTの分布を推計する方法を提案した。モデルの検証や改良点等の課題はあげられるが、熱中症予防のための一つのツールとして活用することができる可能性を示した。

ヒートアイランドの対策の推進にあたっては、上記の結果を踏まえ、長期的な視点で、より効果的な対策手法について検討を行う必要がある。本研究では地表面温度を下げるという点に着目し、効果的な対策について考察を行ったが、ヒートアイランド現象を抑制するためには地表面温度の低減が気温の抑制にどの程度の効果があるのかという点について、より定量的な評価を行う必要があると考えられる。また、ヒートアイランド現象は、エアコン等の普及に伴って人工排熱の増加が影響を及ぼしている面も考えられるため、人工排熱の低減についてもあわせて検討を行う必要がある。

熱中症対策としては、クールスポットの創出等、快適な歩行空間の整備が求められる一方、高齢化の進展に伴って屋内において熱中症の被害が生じるケースも見られる。このため、気温や湿度に注意することや、屋内でも適度に水

分補給を行うこと等、熱中症予防に関する基礎知識について、あわせて啓発を行う事が重要であると考えられる。

## 謝辞

本研究の遂行にあたっては、関西大学、宮崎ひろ志専任講師をはじめ、諸先生方から有益な助言を頂きました。記して、ここに感謝の意を表します。

## 注

- 1) 吹田市が実施する上記の一連の調査は株式会社パスコが受託して行った<sup>(21)</sup>。

## 参考文献

- (1) 羽島知洋・清水庸・大政謙次, 都市域の気温変化と土地利用変化の関連性の分析, 農業気象 60(4) (2004), pp291-297.
- (2) (社)環境情報科学センター, 平成 22 年度熱中症とヒートアイランド現象の関係解析調査業務報告書(2011), 環境省
- (3) 赤塚慎・宇野忠・十二村佳樹・杉田幹夫, 甲府盆地における夏季夜間のヒートアイランド現象, 日本ヒートアイランド学会論文集 Vol.6(2011), pp16-22.
- (4) 野々村敦子・増田拓郎, 高松平野における気温と土地被覆・土地利用との関係分析, 環境情報科学論文集 25 (2011), pp329-334.
- (5) 厚生労働省, Press Release (2011.6.24)
- (6) 消防庁, 報道資料 (2010.10.29)
- (7) 環境省, ヒートアイランド対策マニュアル(2011)
- (8) 大西暁生・森杉雅史, 名古屋市中心部における空閑地緑化が都市熱環境緩和効果に与える影響, 社会技術研究論文集 Vol.8(2011), pp149-158.
- (9) 澤田大介・本條毅・丸田頼一・木村圭司, ランドサット TM データによる都市の緑被地と表面温度分布との関係の解析, 環境情報科学論文集, Vol.16(2002), pp.393-398.
- (10) 田中貴宏・森山正和・佐川朋子・山下卓洋, 夏季の大阪市中心部における放射輝度温度分布の詳細な特徴—熱画像と GIS データを用いた夏季の大阪市中心部における放射輝度温度の解析その 1—, 日本建築学会環境系論文集, No.599(2006), pp.119-126.
- (11) 佐川朋子・田中貴宏・森山正和・笹川正, 屋上面の実態調査と屋上緑化・クールルーフ化の可能性評価—熱画像と GIS データを用いた夏季の大阪市中心部における放射輝度温度の解析その 2—, 日本建築学会環境系論文集, No.608(2006), pp.53-58.
- (12) 山下卓洋・田中貴宏・森山正和, 用途地域指定が地域の熱環境に与える影響—神戸市長田区における熱画像解析を通して—, 日本建築学会計画系論文集, No.622(2007), pp.145-152.
- (13) 熊谷市ホームページ「あっぱれ! 熊谷流 熱中症予防情報」, <http://wbgt-jwa.on.arena.ne.jp/kumagaya/>
- (14) 森本武利・中井誠一・寄本明・芳田哲也, 高温環境とスポーツ・運動—熱中症の発生と予防対策(2007), 篠原出版新社

- (15) 山田宏之・養父志及夫・中島敦司・中尾史郎・松本勝正, 異なる地表面状態の屋外空間における夏季暑熱環境の評価, ランドスケープ研究 63(5) (2000), pp543-546.
- (16) 入船嘉之・山田宏之, 種々の舗装材を用いた屋外グラウンドの夏季暑熱環境の比較, 平成 20 年度日本造園学会関西支部研究・事例発表会(2008)
- (17) 村山貢司・登内道彦, 暑熱環境指標 WBGT の連続観測と黒球温度の推定, 日本気象学会大会講演予稿集(2005)
- (18) 近藤純正: 地表面に近い大気の科学(2000), 財団法人東京大学出版会, pp.13.
- (19) (財)日本システム開発研究所・ヒートアイランド現象抑制対策手法検討委員会, 平成 11 年度ヒートアイランド現象抑制のための対策手法報告書(2000), 環境省
- (20) 竹中明夫, 全天写真解析プログラム CanopOn2 (2009), <http://takenaka-akio.org/etc/canopon2/index.html>
- (21) 吹田市, 平成 23 年度吹田市熱環境調査報告書(2012)

(Received September 18, 2012, Accepted October 9, 2013)