

上空から撮影された熱赤外画像に基づいた 堺市域における表面温度分布の推定

Surface Temperature Distribution in Sakai City Area Estimated from Aerial Observation of Infrared Thermal Images

安田 龍介*¹ 中川 文里*¹ 吉田 篤正*¹
Ryusuke Yasuda Fumisato Nakagawa Atsumasa Yoshida

*¹ 大阪府立大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

Corresponding author: Ryusuke Yasuda, yasuda@me.osakafu-u.ac.jp

ABSTRACT

We have estimated the distribution of the surface temperature in Sakai city, at 1400 LST and around 2300 LST in midsummer, from the infrared thermal image data obtained from aerial observations and the ground level measurements. The relation between land use and the surface temperature were investigated.

In the daytime the surface temperature of the area where latent heat transport is dominant (sea, river, forest, park, etc.) is relatively low, however, the surfaces of their surroundings are not cooled because the surface temperature largely depends on the thermal characteristics of the surface material. In the nighttime, the surface temperature of inland water, such as reservoir ponds and moats of ancient tombs, shows the highest value among the land use categories. In the daytime the surface temperature of the middle- and high-rise residential areas is almost same as the low-rise spaced residential area. On the other hand, the surface temperature of the middle- and high-rise residential areas shows relatively higher value than the low-rise spaced residential area in the night time because the heat capacity of the buildings is large and the covering ratio of paved surface is high.

キーワード: 熱赤外画像, 上空観測, 表面温度, 土地利用, ヒートアイランド

Key Words : Infrared thermal image, Aerial observation, Surface temperature, Land use, Heat island

1. はじめに

ヒートアイランドによる気温上昇は、とりわけ夏季において生活環境の悪化をもたらす。その顕著な特徴は、最低気温の上昇に伴う熱帯夜の増加に見られるが、近年は地球温暖化と相まった最高気温の上昇により、夏季日中の暑さが人体に及ぼす悪影響も重視されている。気象庁は2007年より日最高気温が35℃以上となった日を「猛暑日」として予報用語に追加しており、また、環境省は熱中症に対する注意を促すことを目的に、「暑さ指数」(WBGT)や熱中症患者の搬送数に関する情報提供を行っている⁽¹⁾。

大阪は少雨・多照が特徴の瀬戸内気候区分に属している上、人口が密集する平野部は西側以外の三方を山系に囲まれており、日本でも有数の暑熱都市⁽²⁾と言われている。2004年策定の大阪府ヒートアイランド対策推進計画⁽³⁾においても「住宅地域における夏の夜間の気温を下げ、2025年までに夏の熱帯夜数を現状より3割減らす」ことと共に、「屋外空間にクールスポットを創出し、夏の日中の熱環境の改善を図り、体感的な温度を下げる」ことが目標に掲げられており、夏季日中の暑熱緩和は大阪地域における重要課題の一つとなっている。大阪府堺市は大阪市域と同じく日中は大阪湾からの海風が卓越する頻度が高い⁽⁴⁾。2003年～2012

年の10年間で大阪と堺のアメダス観測所データを比較すると(表1)、熱帯夜(日最低気温が25℃以上)日数は大阪の方が多いが、猛暑日日数や夏季の日最高気温は大阪のそれらを上回っており、大阪と同様、堺においても日中の高温対策が喫緊の課題であることがわかる。

ヒートアイランド対策を検討する際、対象地域内の気温分布を把握することは重要であるが、気温は観測点の周囲条件(土地利用状況、建物、植栽など)の影響を受けやすいため、アメダスや自治体の気象常時観測点など離散的に配置された観測点の測定値からその空間分布の詳細を推定するのは難しい。これに対し、熱赤外画像は地物表面の熱赤外放射量から推定される表面温度の面的分布を表すものであり、土地利用や地表面被覆の状況に応じた地域特性が反映される。表面温度は気温と直接対応するわけではないが、気温を支配する主要因の一つであり、その分布は熱環境の地域特性を把握し、暑熱対策を講じる上での基礎情報となる。前述の大阪府ヒートアイランド対策推進計画では、航空機によって撮影された熱赤外画像が熱環境(熱負荷特性)マップを作成する際の基礎資料として用いられている。

筆者らは、堺市域周辺における夏季高温の実態を把握するための一助として、熱赤外カメラをヘリコプターに搭載し、日中と夜間に上空から地表面の熱赤外画像を撮影した。

表1 アメダス地点における暑熱指標の比較
(統計期間：2003～2012年)

	熱帯夜 日数	猛暑日 日数	日最高気温の平均 (°C)		
			7月	8月	9月
大阪	433	134	31.6	33.7	30.2
堺	252	162	31.6	33.9	30.3

また、これと並行して地上気象の観測を実施し、大気による放射減衰ならびに撮影時間の経過に伴う温度変化の補正を行うことにより、堺市域における表面温度分布図を作成した。本稿では、堺市における表面温度の分布状況および土地利用分類との対応の調査事例について報告する。

2. 観測概要

2.1 対象地域と観測日時

堺市は大阪府の中南部に位置しており、西側は大阪湾に面している。北側は大和川を挟み大阪市に接し、南東部の丘陵地以外はほぼ平地となっている(図1)。臨海部の埋立地は工業用地が多く、一方、平野部から丘陵部は住宅地や農地が多い中、この地方の特徴である古墳や溜池が散在している。本研究の撮影地域は市南端の一部を除き、堺市内平野部のほぼ全域をカバーしている。

観測は2006年8月2日の日中と夜間に分けて行った。ただし、夜間の観測では一時的に雲が多くなったため市北部の上空観測を中断し、同月4日の夜間に再度観測を行った。8月2日から4日の大阪地域は太平洋高気圧に覆われ降雨はなく、晴天弱風の天候であり海陸風が発達する典型的な夏場の気象状態にあった。堺アメダスでは、7月26日から1週間にわたって降雨は観測されておらず、期間中の日最高気温は連日34℃を超えており、日最低気温は24℃以上、日平均風速は1.2～1.6m/sであった。8月2日には「南河内地域」と「東大阪地域」に、4日はこれに加え「堺市及びその周辺の地域」に光化学スモッグ注意報が発令されている。

2.2 飛行観測

ヘリコプターに非冷却型の熱赤外放射カメラを搭載し、飛行しながら地表面の熱赤外画像のコマ撮りを行った。表面温度に換算する際、本来は測定対象面の種類に応じた赤外放射率を設定すべきであるが、撮影している地表面の被覆状態は実際には不明、かつ、基本的に不均質であり、撮影シーンに応じた正確な放射率分布を付与することは困難なことから、放射率は1.0に設定した。本研究の主眼は都市表面温度の分布傾向を調べることにあり、また、各種の温度補正も併用するため、その絶対値についてはある程度の誤差も許容する。なお、環境温度が30℃の場合、放射率が0.95の表面温度は40℃のとき約0.5℃、50℃では約0.9℃低めに算定されることになる。

各撮影時の飛行高度、熱赤外画像撮影枚数および空間解像度を表2に、熱赤外画像カメラの仕様を表3に示す。飛行経路は東西方向を往復しながら2日は測定エリアの南から北へ、4日は測定エリアの北から南へと移動した。撮影高度は各測定日時で一定とした。1枚の熱赤外画像の撮影エリアは、8月2日が約1920m×1440m、同4日が約1280m×960mであり、隣り合う撮影コース間の画像の重複率は約50%である。また、熱赤外画像測定と同時に気温、湿度、高度、GPS位置座標のデータも連続的に取得した。

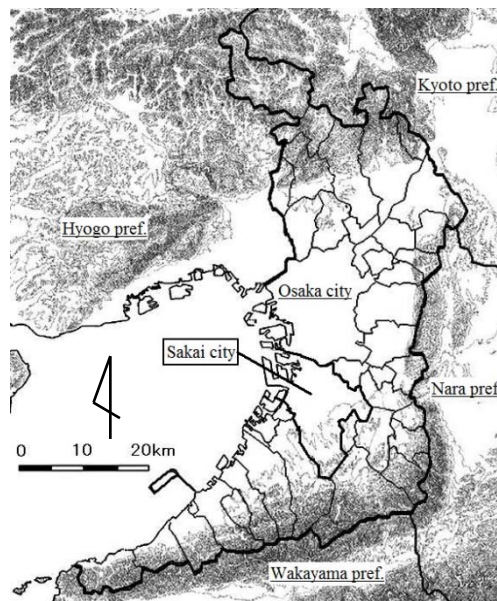


図1 堺市の位置と地形
(等高線は50m間隔)

表2 飛行観測の概要

Date	Height	No. of Pics. (Interval)	Spatial Resolution (approx.)
2006/8/2 14:05-15:52	1950 m	6406 (1s)	6 m
2006/8/2 22:03-23:10	1910 m	4032 (1s)	6 m
2006/8/4-8/5 23:11-0:52	1120 m	4334 (1.0-1.5s)	4 m

表3 熱赤外画像カメラの仕様

Sensor name	TS7302 (NEC Sanei)	Field of view	29°(H)×22°(V)
Temp. range	-20 to 100℃	Spectral range	8 to 14μm
Pixels	320(H)×240(V)	Accuracy	±2%

2.3 地上観測

大阪府立大学構内において、撮影時間帯に合わせて30分毎に放射温度計(Konica Minolta社、HT-10D)を用いて地表面温度の巡回測定を行うと共に、同校運動場で気温、湿度の定点測定を行った。巡回測定箇所の土地被覆は、「裸地」「芝生(2箇所、I、IIと呼ぶ)」「アスファルト」「砂礫」「タイル」の5種である。また同時時間帯に神戸大学のグループにより、旧堺港では「海面」「道路(コンクリートとアスファルト)」「コンクリート」の3種、大仙公園では「芝生(III)」(但し8月2日日中のみ)において、それぞれ20分毎に放射温度計(HORIBA社、UT-2F)を用いた巡回測定が行われた(図2)。いずれの巡回測定においても放射温度計の放射率は1.0としており、また、各区画内で5～10点の測定を行っている。

8月2日の日中に大阪府立大学構内で測定された地表面温度の変化の様子を図3(a)に示す。いずれの土地被覆においても日中の地表面温度は14時頃をピークに、以後、時間と共にそれぞれほぼ一定の割合で下降しており、撮影時間内の変化が大きいことがわかる。撮影時間内の温度変化はアスファルトが最も大きく約8℃であった。一方、夜間

[テキストを入力してください]

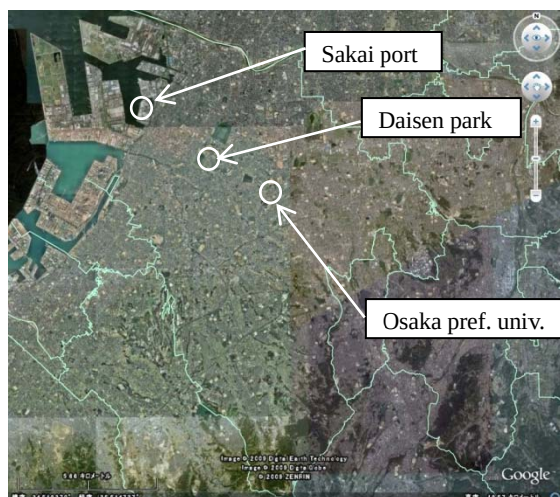
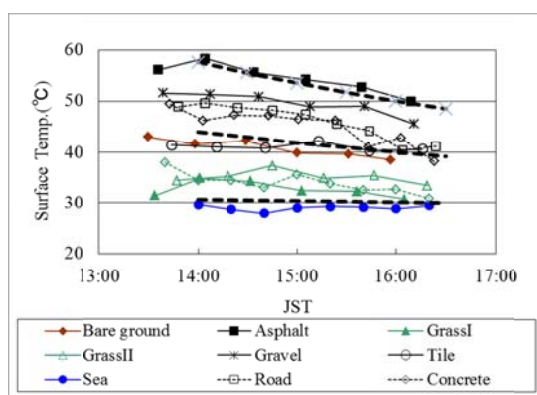
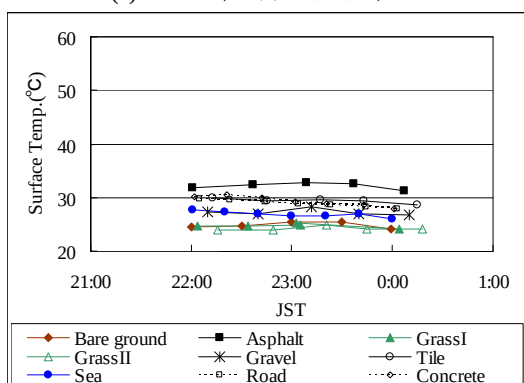


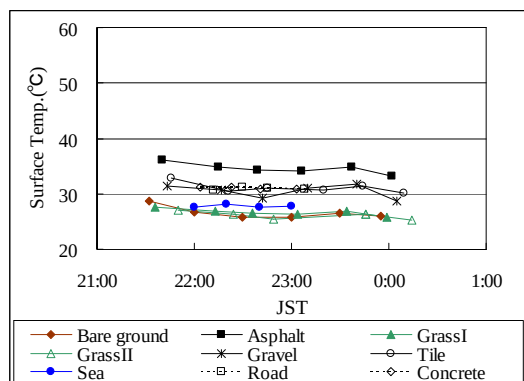
図2 地上観測の実施場所



(a) 2006年8月2日 日中



(b) 2006年8月2日 夜間



(c) 2006年8月4日 夜間

図3 地上観測点における地表面温度の時間変化
(a)の破線は時刻補正式を表す)

の撮影時間帯 (22 時～25 時) では、2 日と 4 日のいずれの測定点においても温度変化は小さく、最大でも 2°C 以内に収まっている (図 3(b)(c)).

3. データ処理

3.1 熱赤外面像の幾何変換と補正

上空で撮影された熱赤外面像から表面温度分布を推定するにあたり、以下の(1)から(4)の処理を行った。なお、熱赤外面像の撮影は $1.0\sim 1.5\text{ s}$ 毎に行われており、ヘリコプターの進行方向の画像重複率が極めて高いため、隣接画像との重複率が 50% 程度になるよう 10 枚～20 枚毎に撮影状態の良いシーンを選んでデータ処理を行った。

(1) 温度異常の補正 撮影開始から一定時間が経過した後の熱赤外面像全てにおいて、一隅をピークとする異常な高温域が見られた。撮影区域が移動しても画像上ではこの異常域の位置に変化がみられないことから、撮影に使用した熱赤外カメラ (CCD センサー) の遮熱状態に問題があると推察された。そこで、放射温度がほぼ一様と考えられる海面の熱赤外面像を用いて温度異常の補正量を算出し、原画像からこれを差し引くことで補正を行った。温度異常の最大補正量は 8/2 日中で 7.4°C 、8/2 と 8/4 の夜間はそれぞれ 6.1°C と 6.0°C であった。

(2) 大気補正 野中ら⁽⁵⁾の方法に従い、飛行観測・地上観測および NCEP (米国環境予測センター) のデータベースから得られた気温と湿度のデータを大気放射伝達計算ソフトウェア MODTRAN (ONTAR 社) で解析し、大気による減衰や天空照度・光路輝度の影響の補正を試みたが、地上観測で得られた地表面放射温度との一致度は必ずしも良くなかった。そこで、地上観測値とその位置における熱赤外面像上の温度との線形回帰式を求め、熱赤外面像の温度を表面温度に換算した。図 4 は土地利用毎に予め定めた巡回観測の各区画 (数十 m 四方程度、区画による) の直上をヘリコプターが通過した時刻における熱画像温度と地上観測値との対応を示している。熱画像温度は各区画内において無作為に 5 ピクセルを選定して読み取った値、地上観測値は各区画内の観測値 (5～10 点) であり、それぞれ平均値に標準偏差のエラーバーを付してプロットしている。回帰式作成に当たっては、「裸地」と「芝生 II」の観測値は検証用データとするため除外し、これら以外の土地被覆の地表面温度データを用いた。但し、8/2 夜間については、臨海地区の撮影ができず回帰式を求めるデータ数が少ないため検証は「芝生 II」のみとした。

(3) 時刻補正 日中の撮影を行った 14 時以降の表面温度は日最大を過ぎて下降傾向にあり、撮影の間にも表面温度は時々刻々変化している。したがって、表面温度の地域分布を調べるには、撮影時刻の違いによる温度変化の影響を除去する必要がある。日中の表面温度は場所毎に大きく異なるが夜間にはその差はごく小さくなることから、日中の昇温が大きい場所ほど時間経過に伴う温度の下降率は大きいと考えられる。そこで、地上観測結果から地表面温度とその時間変化率との線形回帰式を求め、大気補正済みの熱赤外面像温度を 14 時時点の値に換算した。図 3(a) に時刻補正式の例 (16 時にそれぞれ $30, 45, 55^{\circ}\text{C}$ である場合) を示す。夜間については、前述のとおり撮影時間内の温度変化が小さいため、あえて時刻補正は行わなかった。

(4) 幾何補正 熱赤外面像に位置情報を付与するため、数値地図 (2500 空間データ基盤、国土地理院発行、2005 年) を用いて GCP (Ground Control Point) の読み取りを行った。熱赤外面像のピクセル座標と地図座標との対応関係か

[テキストを入力してください]

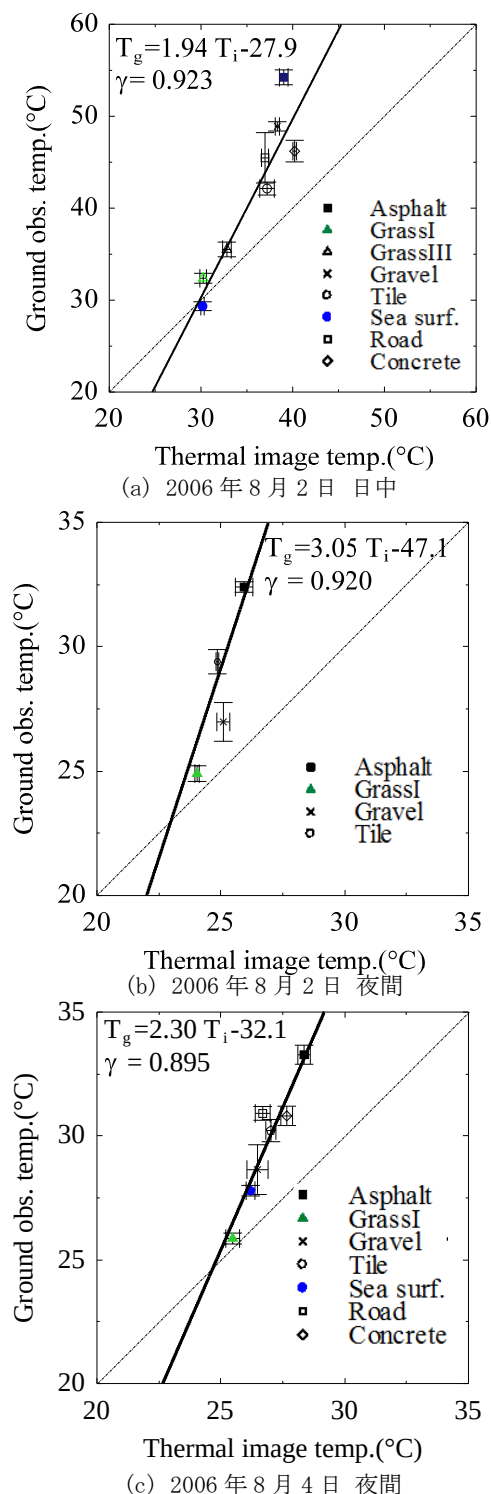


図 4 地表面温度の相関 (T_g : 地上観測, T_i : 熱赤外画像, γ : 相関係数, シンボルは平均値, エラーバーは標準偏差を表す)

ら非線形最小二乗法により, 各シーンを撮影した熱赤外カメラの姿勢と位置を推定し, 画像歪みを補正した後, 平面直角座標系 (VI系) 上でモザイク処理した。この処理では,

- ・各画像の中心に近いほどレンズによる歪みが小さい
- ・撮影はほぼ鉛直下向きに行われているため各画像の中心に近いほど大気減衰の影響も小さい

と仮定し, 同一地点が撮影されている複数枚の画像の中か

表 4 補正済み熱赤外画像温度と地上観測値との比較

Date	Surface type	Thermal image temp. (°C) Mean (S.D.)	Ground obs. temp. (°C) Mean (S.D.)
2006/8/2	Bare ground	41.3 (1.0)	41.6 (0.3)
	Grass II	34.6 (1.0)	34.7 (0.7)
2006/8/2 Nighttime	Grass II	24.3 (0.3)	24.3 (0.2)
2006/8/4	Bare ground	25.7 (0.2)	26.2 (0.2)
Nighttime	Grass II	26.1 (0.7)	25.9 (0.1)

ら, 画像中心に最も近いピクセルの温度を採用した。航空写真のモザイク処理では画像の接合部周辺で値を平滑化するなど, 見た目の連続性を重視した処理が行われることがあるが, 本研究ではその処理は行わなかった。また, 観測日が異なる夜間画像は各日で独立に扱っており合成は行っていない。得られたモザイク画像から解像度 4 m でリサンプリングを行った。リサンプリングの解像度は原画像の解像度とほぼ同じであるため最近隣内挿法⁽⁶⁾を用いた。

3.2 検証

熱赤外画像の補正値を地上観測値と比較した。比較地点は, 8 月 2 日の日中と 8 月 4 日の夜間については大阪府立大学構内の「裸地」と「芝生 II」, 8 月 2 日の夜間は「芝生 II」である。熱赤外画像から推定した値は, 日中は 14 時, 夜間はヘリコプターの撮影時間帯の代表値であることから, 比較対象とする地上観測値については, 日中は 14 時 00 分を挟む測定値 (平均値, 標準偏差) の線形補間, 夜間は撮影時間帯の地上観測値を算術平均して求めた。結果を表 4 に示す。平均値の差が最も大きいのは 8 月 4 日夜間の「裸地」で 0.5 °C, それ以外は 0.3 °C 以下であり昼夜とも良好な推定がなされていることを示している。

4. 結果と考察

4.1 堺市域における表面温度分布の傾向

市内の大きな表面温度分布を把握するため, 得られた表面温度を 50 m 解像度に平均化して分布図を作成した。結果を図 5(a) (b) に示す。

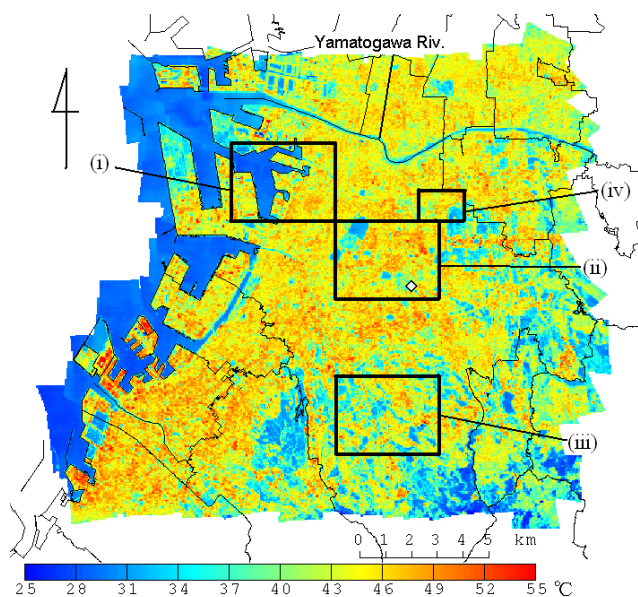
(1) 日中 (14 時) の表面温度分布 8 月 2 日, 堺アメダスでは 14 時 10 分に最高気温 34.2 °C を記録している。表面温度について見ると海面は約 30 °C である。大阪市に隣接する市の北部から中央にかけての平野部では多くの区域で 45 °C を超えており, 一方, 古墳や大規模緑地, まとまった農地は 30 °C 台の低温となっている。市南部の丘陵地は, 概して平野部より温度が低く 30 ~ 40 °C の区域が多く見られる。これは丘陵部では緑被率が比較的高いためと考えられる。ただし, 団地や駅周辺など人工被覆面の多い区画では 45 °C を超える高温域となっている。湾岸の埋立地も, 緑地となっている一部の区画を除けば内陸部とほぼ同程度の高温を示している。

(2) 夜間の表面温度分布 堺アメダスの気温は 8 月 2 日の 22 時から 23 時は 25 °C 台, 8 月 4 日 23 時から翌 1 時は 26 ~ 27 °C で推移している。

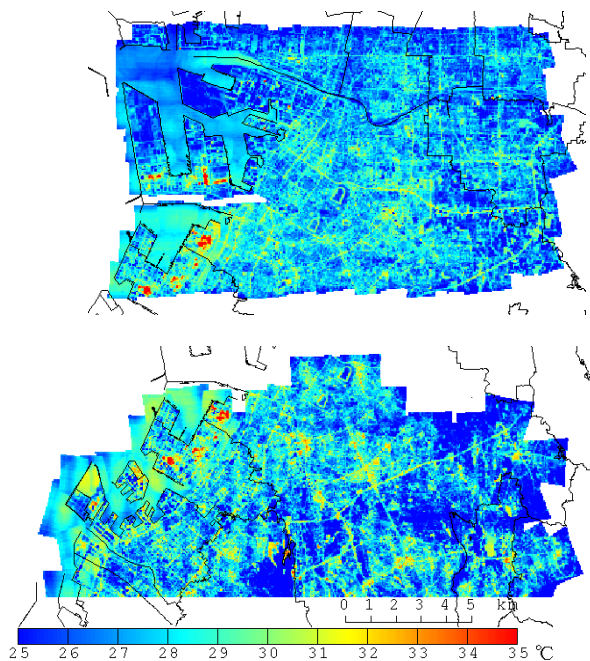
図 5(b) の上段は 8 月 4 日夜間における堺市の中～北部の表面温度分布を示したものである。夜間の表面温度は日中に比べ温度差が小さく概ね 25 ~ 30 °C の範囲にあるが, 道路は相対的に高温であり 30 °C を超す線状のパターンとして現れている。

下段は 8 月 2 日夜間における堺市の中～南部の表面温度分布を示している。平野部と南部の丘陵地の表面温度差は

[テキストを入力してください]



(a) 日中 (2006 年 8 月 2 日 14 時, 図中の枠はそれぞれ図 7 の(i)臨海部 (ii)平野部 (iii)丘陵部(iv)住宅地。◇印は 2006 年当時の堺アメダスの位置を表す)



(b) 夜間 (上: 2006 年 8 月 4 日, 下: 同 8 月 2 日)

図 5 表面温度分布の推定結果

日中と比べて小さいことがわかる。北部の夜間画像と同じく幹線道路が高温域として現れており、また、幹線道路が交差する幾つかの地点は高温域を形成している。沿岸の工業用地や港湾地区では表面温度が高い区画が連なっており、工業用地内では煙突等の排気口や、そこから排出される白煙や排煙によるとと思われる高温を示す区画が点在している。

4.2 各地域における表面温度分布の特徴

図 6 に地域ごとの可視画像および表面温度分布を示す。

(i)～(iii)の画像は横が東西 4 km、縦は南北 3 km の区画、(iv)は(ii)の平野部の北東側に位置する東西 1.2 km×南北 1.0 km の小区画であり、いずれも解像度は 4 m である。

(i)臨海部 図 6(i)の海岸側は埋立地の工業用地であり、

内陸側は商業・業務用地および宅地の比率が高い。堺アメダスにおいて日中は西の風が観測されており、臨海部では海風が吹いていると考えられるが、海岸付近においても地上の幹線道路や建物屋根面は 50 °C 近い高温となっており、臨海部の表面温度は平野内の中央部とほとんど差がない。したがって、海風が地上の表面温度に及ぼす冷却効果は小さいと言える。ただし、海風が気温に及ぼす影響については移流の効果が大きく加わるためこの限りではない。また、画像中央を縦断している高架高速道の路面は地上の一般道より低温となっているが、これは高架道の下面からも放熱があることと、地上より風速が大きいためと考えられる。図中には表面温度が 20 °C を下回る建物が点在しているが、これらは表面材の赤外放射率が小さく放射温度が低く算定されているとみられ、実際の表面温度を必ずしも表していないと推察される。

夜間の画像では、地上の路面温度が高く幹線道路は特に高温となっている。図中の破線で囲んだ区画は、日中の表面温度は周囲とあまり変わらないが夜間は周囲に比べて高温になっている。この区画は中高層の商業・業務建物が並ぶ堺市の市街地であり、日中に蓄熱した建物からの放熱や密集建物による夜間放射冷却の阻害といった都市キャノピー効果が影響している可能性がある。

(2)中央部 図 6(ii)に示す平野の中央部では住宅地の中に古墳や溜池が散在している。日中の表面温度は住宅の密集地付近で高く、古墳や溜池、大学敷地などが低温となっている。古墳では、濠とその内側の樹林で覆われた墳墓との間に温度差がほとんどみられない。図中の破線で囲んだ一帯は特に高温域が密集しているが、低層の大型店舗が幹線道路沿いに並んでおり、駐車場や更地が比較的大きな面積を占めている区画である。

夜間については、道路が明瞭な高温を示しているのは他地域と同様である。また、日中の画像で示した高温域にある商業施設や駐車場は夜間も引き続き高温となっている。一方、古墳の濠や溜池の表面温度は日中と異なり周囲の建物や緑被面に比べて高く、海面とほぼ同じ 30 °C 前後を示しており、夜間は熱源となっていることがわかる。

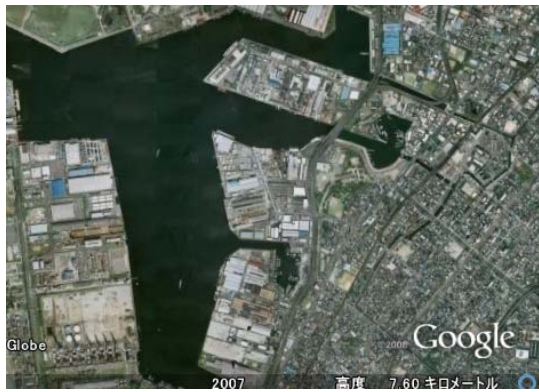
(3)丘陵部 図 6(iii)に堺市南部における日中の画像を示す。この地域は北西から南東に向けて緩やかな上り勾配を持つ丘陵地であり、最も標高が高い南東端で海拔 100 m 弱である。田畑や樹林などの緑地や溜池が多いため、臨海部や平野部に比べ 30 °C 程度の低温となっている区画が多い。主要な幹線道路は高架や掘割構造の箇所が多く臨海部や平野部の道路ほど表面温度は高くない。一方、郊外型商業施設の大型駐車場(図中の破線部)では 50 °C 以上の高温として広い面積を占めているのが目立つ。

夜間の画像については、他の 2 地域と撮影日が異なるので直接比較はできないが、日中高温であった大型商業施設や道路のほか、日中は低温であった溜池が相対的に高温となっている。画像左側を縦断する道路沿いに高温域が連なっているが、これも郊外型店舗とその駐車場である。

(4)住宅地 図 6(iv)の可視画像において赤色で示した区画は 4～5 階程度の中層集合住宅、青色は細街路を挟む大小様々な低層戸建て住宅、黄色は区画整理されており大きさがほぼ均等な低層戸建て住宅でそれぞれ占められている。

日中の画像では、青色の区画は黄色の区画に比べてやや表面温度が低い部分が多い。これは、散在する敷地が広い住宅では植栽面積が比較的大きいことのほか、建物が密集しているため舗装道路の面積割合が少なく、かつ、路面が日陰になりやすいことによると考えられる。また、赤色で

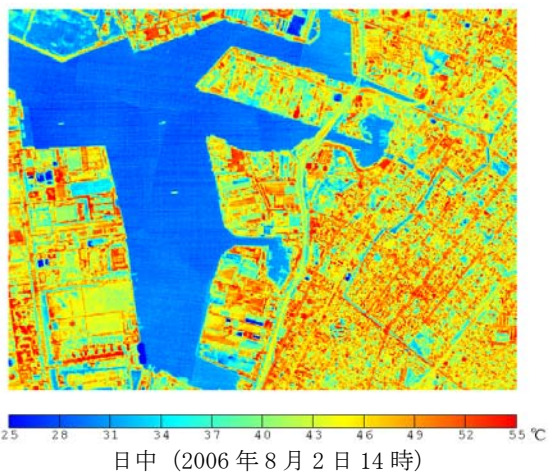
[テキストを入力してください]



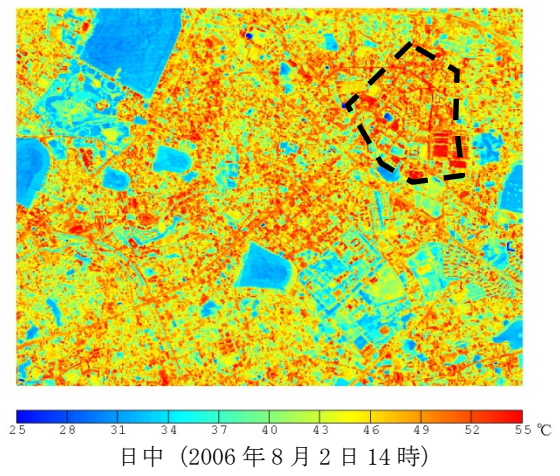
可視画像



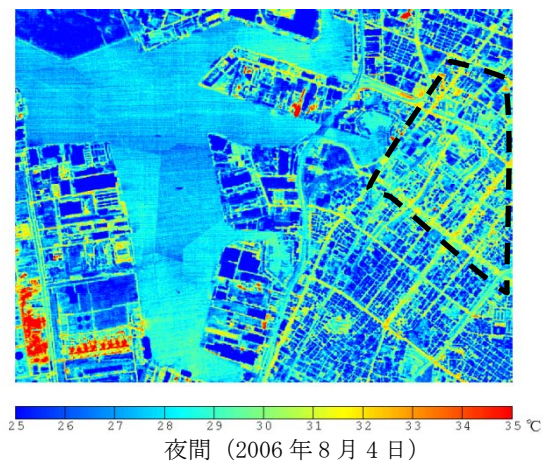
可視画像



日中 (2006年8月2日14時)

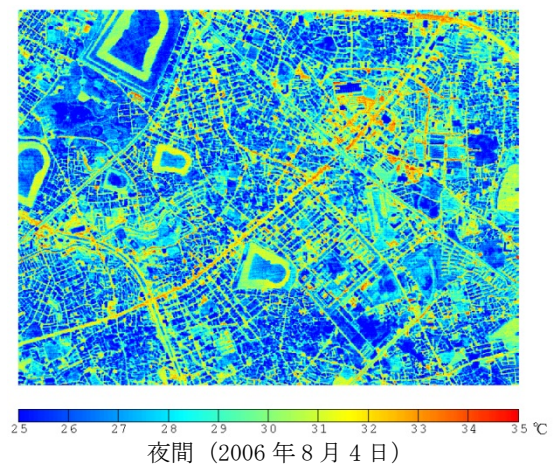


日中 (2006年8月2日14時)



夜間 (2006年8月4日)

(i) 臨海部



夜間 (2006年8月4日)

(ii) 中央部

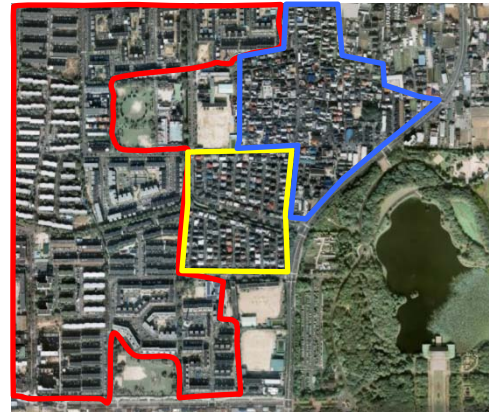
図6 堺市内の各地域における表面温度分布

図6 堺市内の各地域における表面温度分布 (続き)

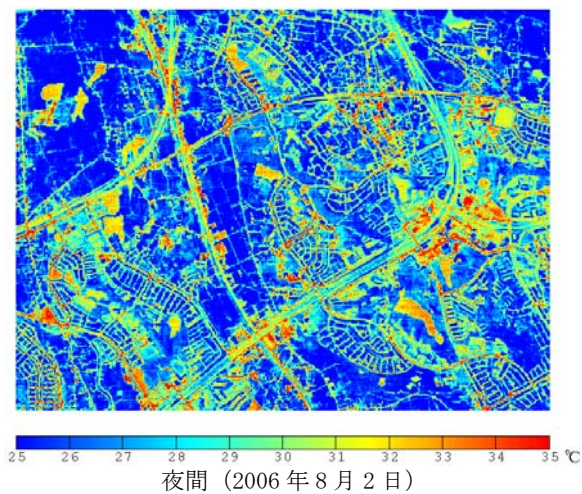
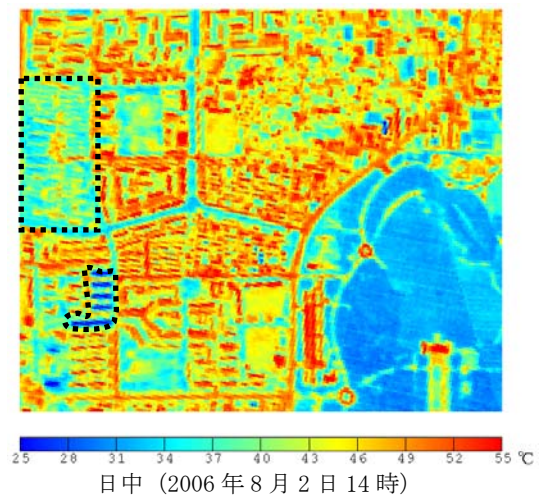
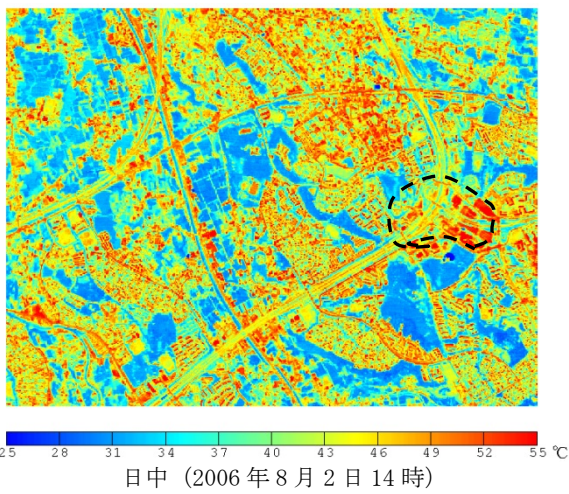
[テキストを入力してください]



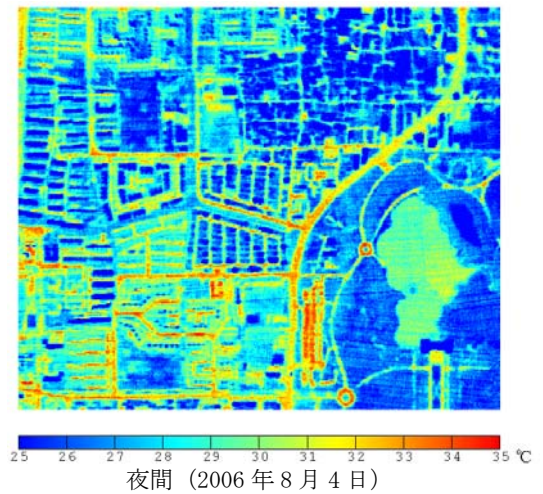
可視画像



可視画像



(iii) 丘陵部



(iv) 大規模公園に隣接する住宅地

図6 堺市内の各地域における表面温度分布 (続き)

図6 堺市内の各地域における表面温度分布 (続き)

[テキストを入力してください]

示した中層集合住宅地の区画内では建物の形状自体には大差がないにもかかわらず、破線で囲った2つの区画はそれ以外の区画より表面温度が明らかに低く現れている。高温となっている区画の建物屋上面が暗色系であるのに対し低温区画の屋上面は白色に近いことから日射の反射率が高く、また、低温の区画は路面が樹冠に覆われている面積割合も多いことから、これらがこの区画における表面温度の高温化を抑制していると考えられる。同図内右下の大規模緑地の表面温度は30℃程度であり、公園内の池の表面は周囲の緑被面とほぼ同じ温度であるため判別できない。

夜間の画像を見ると、低層戸建て住宅地では建物はほぼ一様に低温となっており、区画整理された区域では建物周りの道路が高温域として現れている。中層集合住宅域では、日中低温を示していた区画の建物は低層戸建て住宅と同程度の低温となっているが、日中高温であった建物や道路は低層中宅地の建物より表面温度が高く、日中の蓄熱が深夜まで影響していることを示している。さらに、中層住宅地は低層住宅地に比べ、道路や駐車スペースなど夜間において温度低下の小さい面が相対的に広い面積を占めており、平均的にも表面温度が高くなっている。大規模緑地内では緑被面より池の方が温度低下は小さいため、日中の画像では判別できない池の形状が高温域として明瞭に浮き出ている。撮影時間帯における堺アメダスの風速は静穏～1 m/sであり、大規模緑地の緑被面上から周囲へ冷気のにじみ出し⁽⁷⁾が生じている可能性もあるが、表面温度の分布からその影響は確認できない。

4.3 土地利用と表面温度

細密数値情報（国土地理院作成10 mメッシュ土地利用）⁽⁸⁾に合わせて表面温度データを10 m解像度に編集し、土地利用区分と表面温度との対応を調べた。土地利用データの調査年が1996年であり現状の土地利用とはある程度異なると予想されること、また、一つの土地利用区分の中には様々な土地被覆が含まれることから、各土地利用区分について温度階級区分（1℃毎）の最頻値を代表温度とした。土地利用は計17種に分類されており、その中には学校や庁舎・駅などの「その他の公共公益施設用地」、自衛隊演習林や古墳などの「その他（基地、皇室関係）」、「造成中地」、「対象地域外」、「その他」が含まれているが、これらは土地被覆と直接的な対応関係がないため解析の対象から除外した。なお、細密数値情報の土地利用データは「空中写真や各種参考資料」を元に作成されており、本研究で扱っている熱赤外放射特性とは独立した判定基準により分類されたものである。

結果を図7に示す。各区分の左側の棒グラフは昼間（14時）、右側は夜間（8月2日）の代表温度を表している。日中は「海」や「河川・湖沼等」の水面、および、「山林・荒地等」「田」「公園・緑地等」といった緑被率が高く水分蒸発（蒸散）が活発な区分で表面温度が低く、「低層住宅地（一般・密集）」「中高層住宅地」「商業・業務用地」「工業用地」「道路」といった人工被覆面を多く含む区分で表面温度が高い。一方、夜間では、昼夜で温度差がほとんどない「海」と「河川・湖沼等」が相対的に高温となり、次いで「道路」「中高層住宅地」の順となっている。「低層住宅地」と「中高層住宅地」を比較すると、「中高層住宅地」の方が昼夜とも高温である。「道路」は日中に高温であるのみならず、人工被覆面区分の中で夜間の温度低下が小さいのが特徴的である。図7中のエラーバーは、各区分における表面温度の度数分布の目安として4分位と3/4分位に当たる温度を示

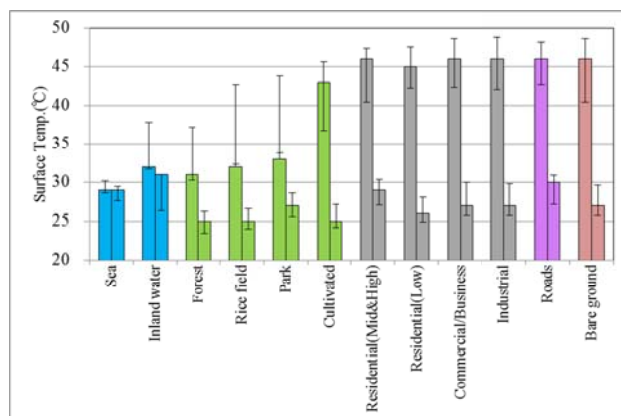


図7 各土地利用区分における表面温度
(左：8/2 日中、右：8/2 夜間)

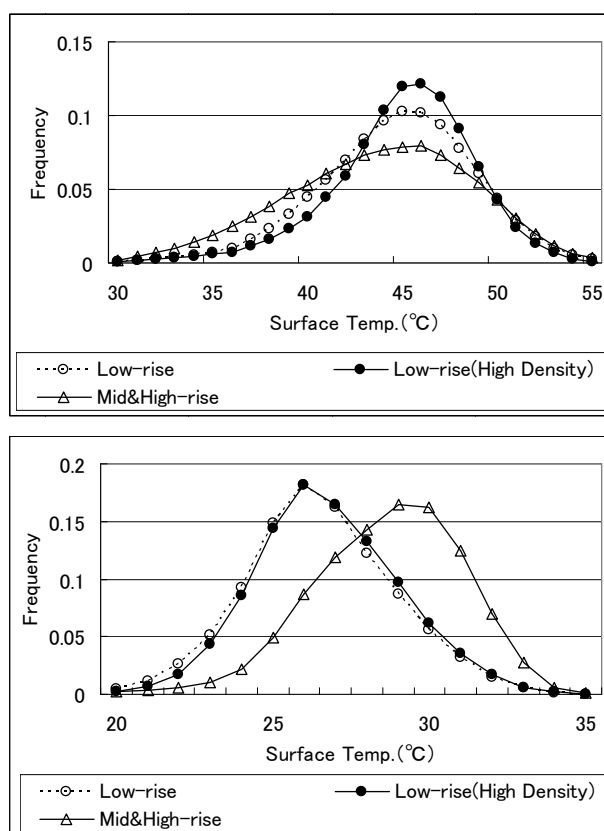
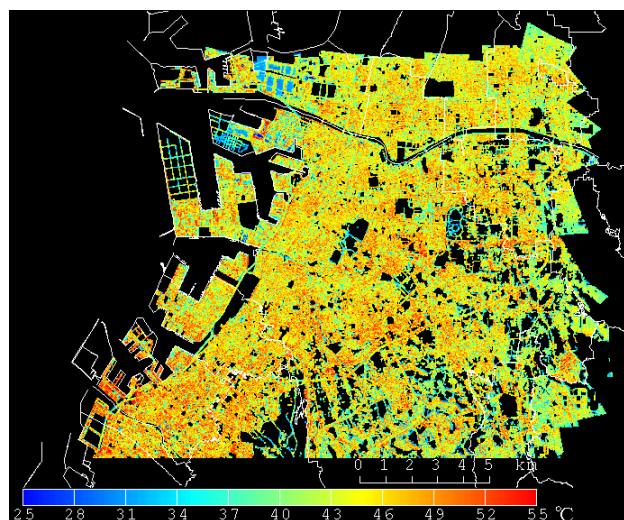


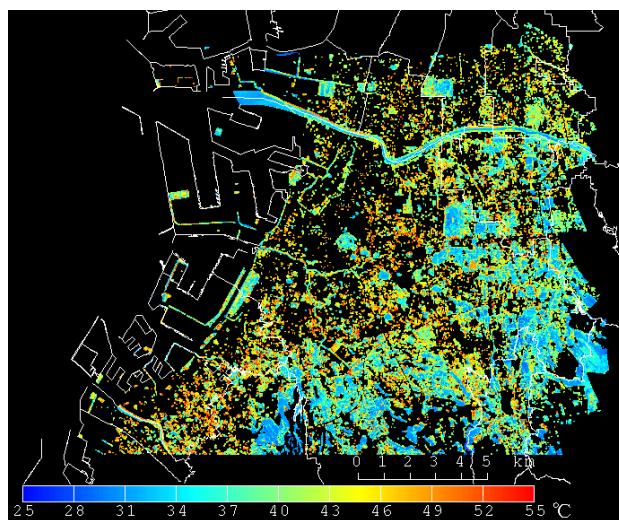
図8 各住宅地域における表面温度の相対度数分布
(上：8/2 日中、下：8/2 夜間)

したものである。「河川・湖沼等」の代表値（最頻値）は日中は4分位、夜間では3/4分位に近い値となっているが、これは、この区分の中には河川数など実際には水面でなく昼夜の温度差が大きい面が多く含まれていることによる。日中の度数分布に関しては、「山林・荒地等」、「田」、「公園・緑地等」は低温側にピークを持ち、高温側に長い裾を持つ分布となっている。中でも「公園・緑地等」の分布にはピークが2つあり、度数がより高い低温側のピーク（33℃）は「山林・荒地等」（31℃）や「田」（32℃）に近く、一方、高温側のピーク（41℃）は「畑・その他の農地」（43℃）に近いことから、樹冠や芝生で覆われている緑被面とそれ以外の舗道や裸地の部分との混合状態を示していると考えられる。夜間では、各区分とも分布幅は小さくなり、「公園・緑地等」

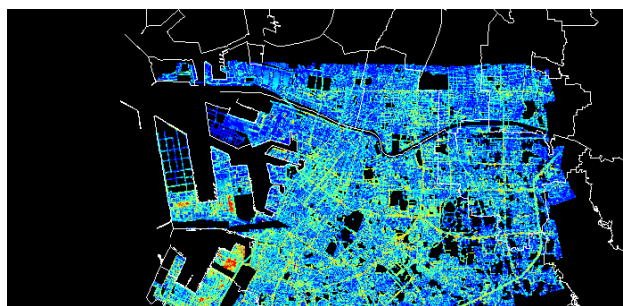
[テキストを入力してください]



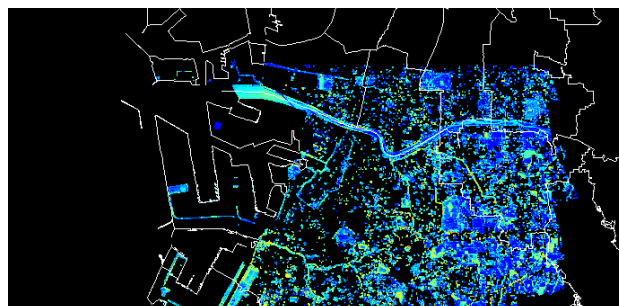
(a)日中(14h): 人工被覆面



(c)日中(14h): 緑被面+内水面



(b)夜間: 人工被覆面



(d)夜間: 緑被面+内水面

図9 人工被覆面と緑被面+内水面の表面温度分布

図9 人工被覆面と緑被面+内水面の表面温度分布 (続き)

もピークは1つとなっている。

図8は住宅地における表面温度の相対度数(区分毎に総数で基準化)の分布を示したものである。日中については、区分間でピーク温度に大きな違いはないが、分布幅は「密集低層住宅地」(3階以下、敷地面積が100㎡未満)、「一般低層住宅地」(同、敷地面積100㎡以上)、「中高層住宅地」の順に低温側に広がっている。これは、密集低層住宅地はほぼ建物のみで占められているが、一般低層住宅地では日中低温である庭や植栽の割合が加わり、中高層住宅地ではさらに建物の影に含まれる面積が大きくなることによると推察される。一方、夜間については、密集低層住宅地と一般低層住宅地の表面温度分布にほとんど差はないが、中高層住宅地の分布はこれら2つと異なり高温側に偏っている。これは建物の熱容量が大きいこと、敷地内の駐車場や道路など日中陽当たりが良く面積の広い舗装面が用地内に

含まれるためと考えられる。

調査地域内の表面温度分布に対して人工被覆面の寄与状態を把握するため、土地利用区分を人工被覆面(「密集低層住宅地」「一般低層住宅地」「中高層住宅地」「工業用地」「商業・業務用地」「道路用地」の6種)と緑被面+内水面(「山林・荒地等」「田」「畑・その他の農地」「公園・緑地等」「河川・湖沼等」の5種)とに分類し、それぞれ該当箇所の表面温度分布図を描いた(対象区分以外の表面は黒色で表示)。結果を図9に示す。日中の人工被覆面の温度分布(図9(a))を見ると、4.1(1)で述べたとおり平野部と丘陵部の間に明瞭な差は見られない。緑被面+水面の分布(図9(c))に関しては、丘陵部では山林や田畑、内水面等が広い低温域を形成している。平野部においても大規模な緑被面や内水面は低温であるが、一方、散在する小規模な区画は高温の箇所が多い。ただしこれらは、休耕地であったり土地利用調

[テキストを入力してください]

査年の後に住宅地や駐車場等へ転用された可能性があるほか、10 m メッシュ化に伴う誤差（他の土地利用との混交）もあるため、場所によっては必ずしも緑被面や水面を代表する値となっていない場合もあり得る。夜間の人工被覆面の温度分布（図9(b)）では平野部・丘陵部を問わず道路の高温が目立つ。特に丘陵部の市街地で道路が密集している区画では図9(d)の緑被面＋内水面に比べて温度差が大きく、この区画の高温域の多くが人工被覆面によってもたらされていることがわかる。また、図9(d)では緑被面に比べ河川や溜池が相対的に高温となっている。

5. まとめ

ヘリコプターから撮影した夏季の日中と夜間の熱赤外面像を基として、地上観測データを用いて補正することにより、堺市を中心とする地域の日中(14時)と夜間(22時～24時相当)における表面温度分布を推定した。細密数値情報(10 m 土地利用)を用いて、土地利用と表面温度との関係を調べることにより以下の知見を得た。

(1) 日中の表面温度は、北部～中央部の平野部で高く南側の丘陵部で低い傾向がある。丘陵部でも団地や駅周辺など人工被覆面の多い区画の表面温度は平野部とほぼ同じであり、平野部と丘陵部の表面温度差は緑被率の相違による。夜間は、日中に比べると地域間の表面温度差は非常に小さい。

(2) 海面や河川、山林や公園など蒸発散による潜熱輸送が支配的な区画では、日中の表面温度が低い。しかし、これに隣接する場所において地表が冷却されている様子は見られず、表面温度は専らその場の土地被覆に依存している。夜間では、この地方に多く見られる溜池や古墳の濠などの内水面は住宅地より高温となっている。

(3) 人工被覆面の中では建物に比べ道路や駐車場といった舗装面が昼夜とも高温である。中高層集合住宅地の表面温度は、日中は低層戸建て住宅地とほぼ同じであるが、夜間はこれらに比べ高温を示す。これは、建物の熱容量が大きいこと、他、敷地内の道路や駐車場など舗装面の面積割合が相対的に大きいことが原因と考えられる。

謝辞

研究費の一部は空気調和・衛生工学会都市平熱化委員会の援助を受けた。また、森山正和神戸大学名誉教授の研究グループには地上測定データを提供頂いた。スカイマップ株式会社には航空撮影でご協力頂いた。あわせてここに謝意を表す。

参考文献

- (1) 環境省, 暑さ指数速報過去データ, 環境省熱中症予防情報, <http://www.wbgt.env.go.jp/>, 2008.
- (2) 河野仁, 鳴海大典, 下田吉之, 大阪一過密都市における気候改善, 日本建築学会編, 都市環境のクリマアトラス, p. 53, ぎょうせい, 2000.
- (3) 大阪府, 大阪府ヒートアイランド対策推進計画, 2004
- (4) 吉田篤正, 安田龍介, 木下進一, 堺市およびその周辺地域の温熱環境の実測と解析, 日本冷凍空調学会論文集, 26, pp. 57-67, 2009.
- (5) 野中崇志, 岡田宏之, 小澤淳真, 笹川正, 航空機搭載赤外センサー TABI による地表面温度推定, 写真測量学会年次学術講演会発表論文集, K-5, 2005, 東京.
- (6) 地球観測データの処理, 資源・環境リモートセンシング実用シリーズ②, p. 102, 資源・環境観測解析センター, 2002.
- (7) 竹林英樹, 森山正和, 実測調査による市街地公園からの冷気のにじみ出し現象の解析, 日本ヒートアイランド学会論文集,

3, pp. 34-38, 2008.

(8) 国土地理院, 細密数値情報(10m メッシュ土地利用) 近畿圏 1996, CD-ROM.

(Received: 2013/9/5 Accepted: 2014/4/8)