

LANDSAT-TM データを用いた地表面温度とその影響要因に関する分析*

Analysis on the Ground Surface Temperature and its Influence Factors based on LANDSAT-TM Data *

石丸 裕史**, 西村 昂***, 山本 勝彦****

By Hiroshi ISHIMARU**, Takashi NISHIMURA*** & Katsuhiko YAMAMOTO****

1. はじめに

都市においては、急速な都市化に伴う土地の人工地被覆が進み、活発な都市活動による人工廃熱が増加した結果、ヒートアイランド現象に代表される熱環境問題をもたらしている。これによって、夏季における都市部では、生理的な不快さが増し、さらに、冷房用電力の増大や都市部特有の異常気象をもたらす等の深刻な影響を及ぼしている。

一方、これらの問題に対処するために、緑化の推進や省エネルギーシステム等の対応策が既に実施されつつあるが、その適切な施策の立案や導入を行うためには、都市全体における効果や有効性を十分把握する必要がある。

そこで、本研究では、地表面温度を熱赤外バンドから算出でき、広範囲を同時に捉えることができる利点を持つ、人工衛星 LANDSAT-TM データを利用して、大阪における実証研究と位置付け、都市熱環境問題の要因を定量的に分析し、大阪においての土地利用による地表面温度への影響程度を把握すること、地域分類ごとにモデル式を作ることによる目的とした。

2. 地表面温度データ

本研究で用いた地表面温度データは LANDSAT-TM の第 6 バンドから推定されている¹⁾。第 6 バンドは地表面からの熱赤外放射を感知しており、その最小画素は 120m 四方である。センサによって観測される放射輝度 ($\text{mW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$) は、TM 第 6 バンドのデジタル値と線形関係にある (図-1)。入手可能な LANDSAT-TM の CCT ファイルには、補正済のデジタル値 (0~255) が格納されている。このデジタル値から、絶対放射輝度を求めるには、以下の式を用いている。

$$R = \frac{V}{D_{\max}} (R_{\max} - R_{\min}) + R_{\min}$$

$D_{\max}$: センサで感知される最大輝度値 (=255)

V : 補正済 CCT デジタル値

$R_{\max}$, $R_{\min}$: センサの最大、最小放射輝度 ($\text{mW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$)

$R_{\max}=1.5303, R_{\min}=0.1238, R$: 絶対放射輝度 ($\text{mW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$)

*Keywords リモートセンシング、地表面温度、土地利用

**学生員、大阪市立大学大学院工学研究科土木工学専攻

連絡先 〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138

大阪市立大学工学部 土木計画学研究室

TEL 06-6605-2731, FAX 06-6605-3077

***フェロー、工博、大阪市立大学工学部土木工学科教授

連絡先 〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138

大阪市立大学工学部 土木計画学研究室

TEL 06-6605-2731, FAX 06-6605-3077

****非会員 大阪府公害監視センター企画室

連絡先 〒537-0025 大阪市東成区中道 1-3-62

TEL 06-6972-1321(内線 381) FAX 06-6972-7665

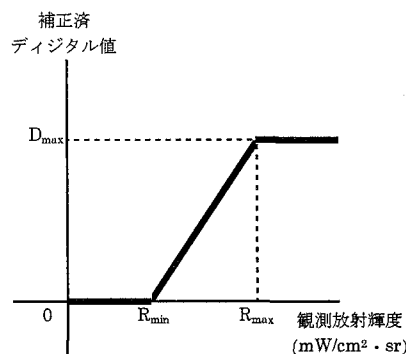


図-1 観測放射輝度と補正済デジタル値との関係

一方、TM 第 6 バンドのセンサは、黒体温度 $T(\text{K})$ からの熱赤外放射に対し、以下の式の放射輝度値を観測している。

$$R = 5.1292 \times 10^{-5} T^2 - 1.7651 \times 10^{-2} T + 1.6023$$

この式から、以下の地表面温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 式が導かれる。

$$T = \sqrt{780.74 + 107.53V} - 100.93$$

T : 地表面温度($^{\circ}\text{C}$)、 V : 6 バンド輝度値

BAND6 の地上分解能は 120m であるが、本研究で用いたものは国土地理院の 2 万 5 千分の 1 の地図と整合性を図るためにデータのひずみ補正を行い、南北方向は 24.6m、東西方向は 28.0m を 1 画素 (1 ピクセル) としたものである。なお、ここでは一定の広域地域での温度変化を検討するため、この値を面平均値として扱っている。

3. 分析概要

はじめに、LANDSAT-TM データから得られる地表面温度の有効性を検討するために、気温との相関を検討している。ヒートアイランド現象に関する研究としては、気温に関するものが圧倒的に多いが、都市の熱循環のメカニズムは、地表の土地利用状況や人の活動に伴う人工熱等を要因として排出される熱エネルギーの伝導、滞留、放射により大気に影響を及ぼしており、気温を用いた視点からのアプローチには限界があると言わざるを得ない。また、ヒートアイランド現象は、気温が尺度となっているが、気温よりも地表面温度の方が操作性に優れており、さらに LANDSAT-TM データは広域のデータを取り扱うことができるため、他の多くの指標を取り込むなどの利点があり、LANDSAT-TM データによる地表面温度データを用いることは、分析にかなり優れていると言える。そこで、地表面温度に大きく影響を与えていると考えられる土地利用について、地表面温度と同様にメッシュ単位を変換した国土地理院発行の細密数値情報の土地利用分類項目を用い分析を行っている。また、

分析対象地域は、図-2 に示す国土地理院発行の2万5千分の1の地形図における大阪府を中心とした15地域において行っている。その結果を踏まえて、影響を受けていると考

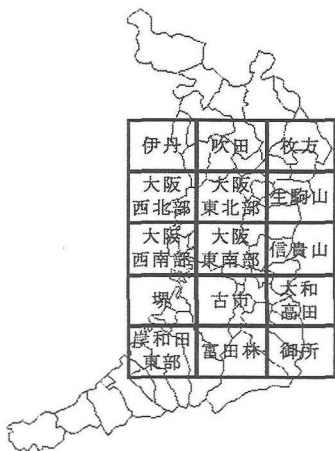


図-2 分析対象地域

えられる土地利用についての指標化を行い、各要因と地表面温度の関係性を分析している。また、その各要因の指標のうち緑地については、LANDSAT-TM データを用いた緑地指標についての検討をしている。以上の結果を踏まえて、地表面温度は地域の特性を大きく受けている、またメッシュ内において複合的な要因があると考えられるために、分析対象地域の地域分類を行っている。最後に、各地域において、地表面温度を従属変数とした重回帰分析により、地表面温度を算出するモデル式を作成している。

4.気温と地表面温度の関係

大阪府大気汚染常時監視データの気温と LANDSAT-TM から得られる地表面温度との相関分析を行う。地表面温度は、衛星画像が撮影された日の大気中の水蒸気量によって吸収される量が異なるために地表から発せられた熱赤外線量と実際の量とは異なってくることを考慮し、比較的、他の気象条件が似かよっている同じ季節である1990年4月16日、1992年4月21日、1997年3月18日の3つのデータについて分析を行った。大阪府大気汚染常時監視局、または気象庁の局の位置にあたるピクセルの地表面温度と観測時刻 (a. m. 10:00 頃) における気温との関係を図-3 に示す。この結果、LANDSAT-TM データから得られる地表面温度と気温との間には強い正の相関を示すことから、地表面温度を分析することは有効であるといえる。

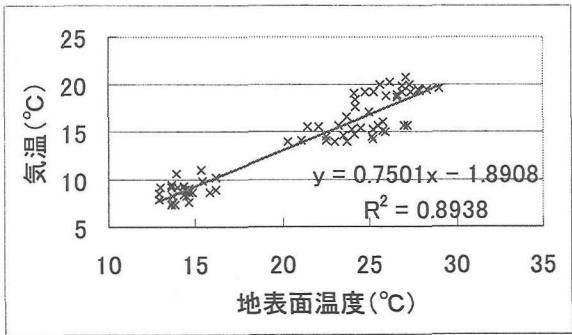


図-3 監視局における地表面温度と気温の相関

5.土地利用と地表面温度の関係

地表面温度に影響を与えると考えられる土地利用について、細密数値情報の土地利用分類項目を用い対象地域における土地利用形態別平均地表面温度を図-4 に示す。

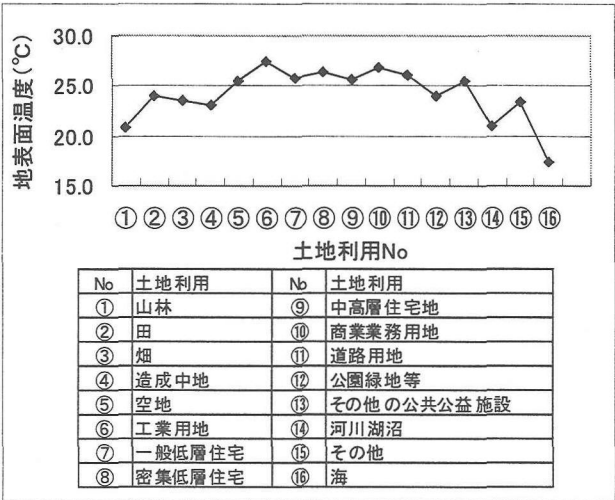


図-4 土地利用形態別平均地表面温度

この結果、自然地の地表面温度は低く、逆に人工地の地表面温度が高い。特に、工業用地の地表面温度は高い。

次に細密数値情報の土地利用を表-1 のように分類し、その分類された土地利用の地表面温度帯 (15°C以下・16°C・17°C・・・33°C・34°C・35°C以上) におけるヒストグラムを図-5 に示す。いずれの土地利用においても、地表面温度は同じ分類項目で大きくばらつきが見られる。地表面温度帯について土地利用別に見ると、「河川・海等」が最も地表面温度帯の低い値に集中し、「工業・商業用地」が最も地表面温度帯の高い値に集中している。また、「河川・海等」で

表-1 再分類した土地利用分類項目

細密数値情報の土地利用分類項目	再分類した土地利用
山林	山林・農地等
田	
畑	
造成中地	造成地
空地	
工業用地	工業・商業用地
商業業務用地	
一般低層住宅	
密集低層住宅	住宅地
中高層住宅地	
道路用地	
公園緑地	公園緑地
河川湖沼	河川・海等
海	その他
その他	
その他の公共施設	その他

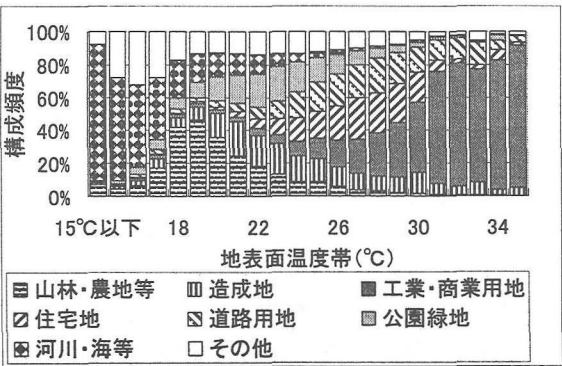


図-5 各土地利用の地表面温度のヒストグラム

の地表面温度の最頻値は、約 17℃程度であり、他の土地利用と比較すると 10 度程度低く、このことから同じ土地利用分類項目において水域などの地表面温度への影響が大きい土地利用が複合されていると、地表面温度がばらつくことは十分に考えられる。また、広域の範囲において分析をおこなっているため、同じ土地利用分類項目でも周辺の影響が大きく異なることなども考えられる。そこで、分析対象地域を国土地理院発行 2 万 5 千分の 1 地形図の 15 地域において、本節では、簡単に、都市部を大阪西北部、西南部、東北部、東南部、郊外部を伊丹、吹田、枚方、堺、古市、岸和田東部、山林部を生駒山、信貴山、大和高田、富田林、御所とし、それぞれの地域についての比較を行う。

はじめに、都市部、郊外部、山林部の 3 地域における、細密数値情報の土地利用の構成割合を図-6 に示す。

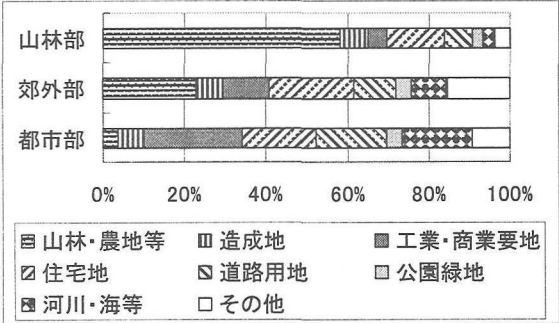


図-6 各地域における土地利用構成割合

都市部においては、「山林・農地等」、「公園緑地」などの自然地は、約 8%と非常に少なくなっており、「工業・商業用地」、「住宅地」、「道路用地」などの人工物系被覆が約 60% 占めている。また、都市部においての「河川・海等」、「造成地」、「その他」の大部分は、淀川と大阪湾が占めていることから、実質上、約 90%以上が人工物で占められていると言える。逆に、山林部は、「山林・農地等」、「公園緑地」などの自然地は、約 50%以上占めている。郊外部は、都市部と山林部の間程度割合である。

そこで、都市部、郊外、山林のそれぞれの土地利用形態別平均地表面温度を図-7 に示す。都市部においては、い

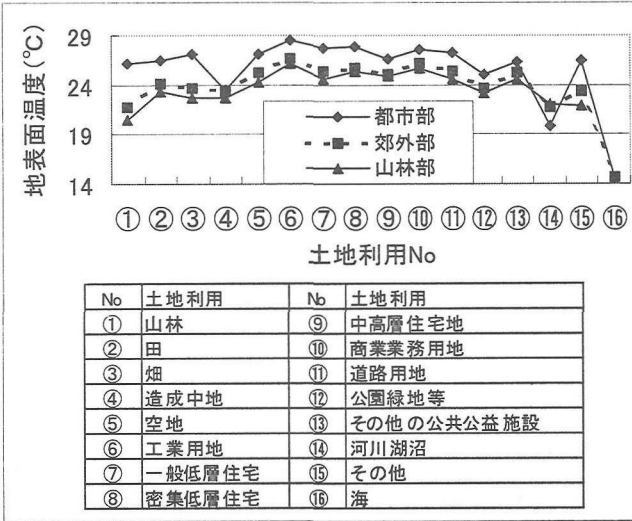


図-7 各地域の土地利用形態別平均地表面温度

れの土地利用の地表面温度においても、他地域と比較すると高い値を示している。この結果から、都市部には、郊外部と比較すると、人工物系土地利用が密集しており、大気温度を受け、地表面温度の地域特性を考慮する必要がある。

6.地表面温度とその影響要因指標

本節では、メッシュ内に複合されている土地利用が判別できないことや、土地利用を用途で分類しているために、公園緑地と識別されたメッシュが公園内の競技場である、また駐車場であるなどの問題を持つ細密数値情報の土地利用の問題を解決し、地表面温度に影響を与える要因について明確にするために様々な指標を用いて検討を行う。

6.1 緑地

緑地と関係があるとされる LANDSAT-TM データから得られる NDVI、PVI 指標を用いてその有効性を検討する。

LANDSAT-TM データの赤色光（第 3 バンド）は、植物体のクロロフィルによって吸収されるために、緑地の多い地域では輝度値が低く、逆に、近赤外光（第 4 バンド）は反射されるために、輝度値が高くなる。NDVI 指標は、この特性を利用して求められた指標で以下の式で表される²⁾。

NDVI= (BAND4-BAND3) / (BAND4+BAND3)

また、PVI 指標は、赤色光と近赤外光のスペクトル散布図上で、土壌表面の観測輝度値の分布が、一つの直線上（ソイルライン）に並ぶことに着目し、観測輝度値のソイルラインからの垂直距離を指標として定義されたものである³⁾。いずれの指標も地表面温度と同様のメッシュ単位に変換している。この PVI 指標は、自然地において、検討が行われたものであるもので、本研究では都市部においても指標として適当かどうか検討を行うために、前節で定義した「都市部」においての赤色光と近赤外光の散布図を図-8 に示す。この図から明瞭にソイルラインが見られることから、PVI 指標について検討することが可能である。

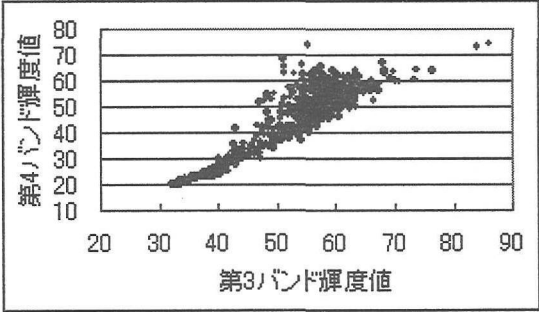


図-8 都市部における赤色光と近赤外光の散布図

そこで、NDVI、PVI の各指標の有効性を確かめるために、緑被率との関係を検討する。緑被率は、本研究では、約 500m メッシュ内における細密数値情報の土地利用分類項目「山林」、「田」、「畑」、「公園緑地」のカテゴリに属するピクセルの割合から算出した。細密数値情報は、用途別の分類であるため、精度に若干問題あるが、ここでは、広域の範囲において指標との関係を見ることを目的としているため、

問題はないといえる。NDVI、PVI と緑被率の相関図をそれぞれ図-9、図 10 に示したところ、明らかに相関が見られる。

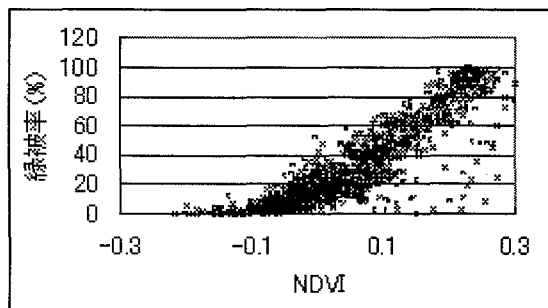


図-9 NDVI と緑被率の相関 ($R=0.894$)

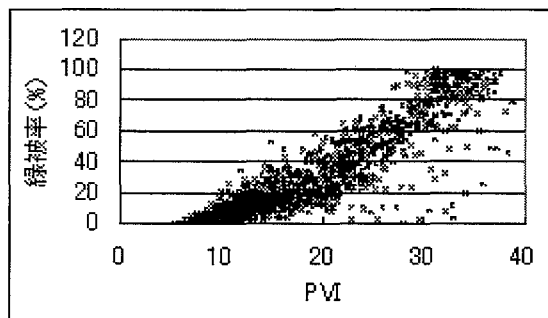


図-10 PVI と緑被率の相関 ($R=0.896$)

次に、NDVI、PVI と地表面温度の相関図をそれぞれ、図-11、12 に示す。NDVI 指標では、指標値の低い地域では水域の影響を受けるため、モデル式を作成する際に共線性の問題が生じる。そこで緑地の指標として PVI 指標を用いることとする。

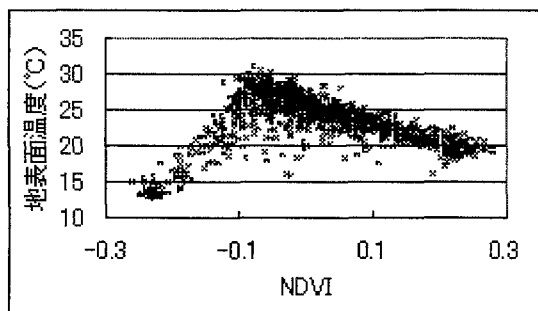


図-11 NDVI と地表面温度の相関

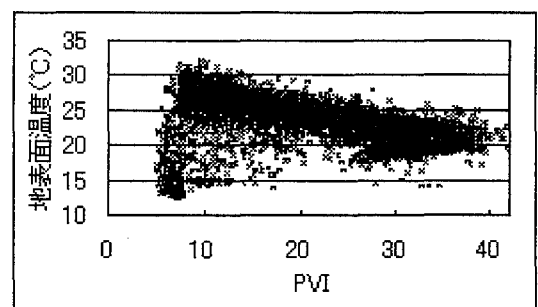


図-12 PVI と地表面温度の相関

6.2 水域

LANDSAT-TM データの近赤外光は、水域において吸収される性質を持っているために、輝度値は低くなり、大阪湾、淀川、古墳の堀なども識別することができる。しかし、大

阪南部に流れる大和川や石川といった河川の判別が明確ではない。そのため、水域面積率は、緑被率と同様に、土地利用分類項目「河川・湖沼等」、「海」のカテゴリに属するピクセルの割合から算出した。水域面積率と地表面温度の相関図を図-12 に示す。緑被率の時と同様に、指標値の高い地域では地表面温度が低く、指標値の低い地域では、地表面温度に大きくばらつきが見られる。

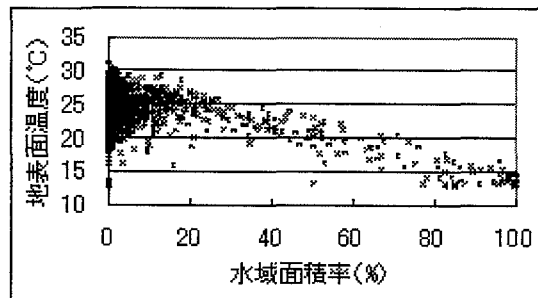


図-12 水域面積率と地表面温度の相関

6.3 都市活動

都市活動は人工排熱などにより多大なエネルギーを放出し、大気に影響を与えている。その指標として、エネルギー使用量と工業用地率の二つについて分析を行う。エネルギー使用量は、大阪府及び大阪市が主要工場（大気汚染防止法、府条例対象）を対象に行っている「燃原料使用状況調査」と、都市ガス、LPG 灯油の販売状況を、家庭、銭湯、小規模工場事業場のそれぞれに対して調査した結果の総計から求められたもので、1km メッシュデータであり⁴⁾、工業用地率は、緑被率等と同様に、土地利用分類項目「工業用地」のカテゴリに属するピクセルの割合から算出した。エネルギー使用量、工業用地率と地表面温度の相関図を図-13、図-14 に示す。ここでエネルギー使用量の指標値は大きくばらついている (0~16000tcal) ために対数値を用いている。いずれの指標においても正の相関を示している。

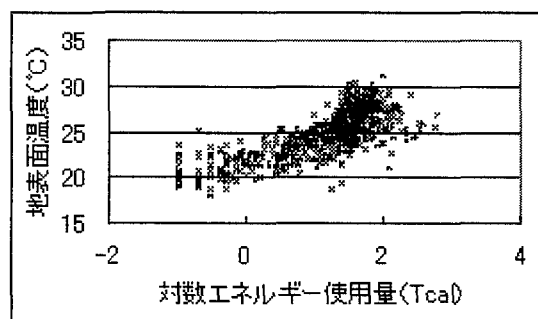


図-13 エネルギー使用量と地表面温度の相関

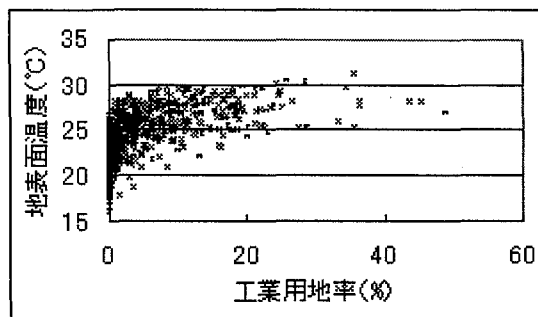


図-14 工業用地率と地表面温度の相関

土地利用の関係で得られた結果のように、土地利用分類項目「工業地域」の地表面温度は他の地域と比較すると非常に高い値を示しているために、一例として、「古市（国土地理院発行の地形図名称）」において工業用地率の高い5地点について分析を行う。その5地点についての1kmメッシュにおけるエネルギー使用量、工業用地率、地表面温度の値を表-2に示す。

表-2 5地点におけるそれぞれの指標値

No	エネルギー使用量 (Tcal)	工業用地率 (%)	地表面温度 (°C)
①	29	45.25	28.31
②	97	18.56	25.17
③	60.5	6.69	24.24
④	16	14.63	25.13
⑤	33.3	13.25	25.81

②と④は、同じ「石川」沿いに位置し、工業用地率、地表面温度では、ほとんど値に差が無いのに対し、エネルギー使用量では、大きな差が見られる。また、①、③、⑤は、周辺に河川が無く、工業用地率が高くなるにつれて、地表面温度が高くなっているが、エネルギー使用量が①、③、⑤の中で最も高い③の地域の地表面温度が最も低くなっている。これらの結果より、工業活動している地域においては、エネルギー使用量よりもむしろ土地利用における工業用地率の方が地表面温度に大きな影響を与えているといえる。よって、都市活動の指標として、工業用地率を用いる。

6.4 建物の密集度

細密数値情報の土地利用分類項目の住宅地では、「中高層住宅地」、「一般低層住宅」の地表面温度が低く「密集住宅地」の地表面温度が高い。この結果から、都市空間の形状が熱環境に影響を与えることは、容易に推測できる。そこで、建物の密集度の指標として建ぺい率（500mメッシュ）、平均建物階数（500mメッシュ）と地表面温度の関係について図-15、図-16に示す。

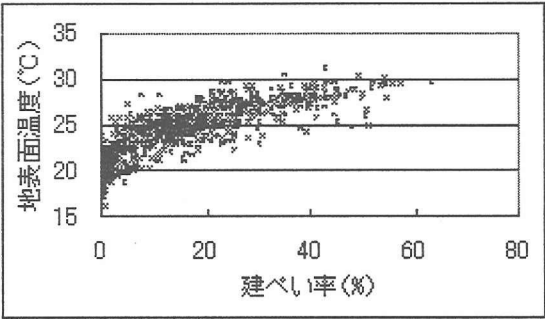


図-15 建ぺい率と地表面温度の相関

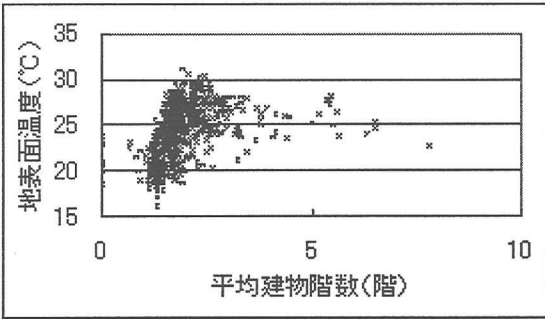


図-16 平均建物階数と地表面温度の相関

建ぺい率と地表面温度の間には、正の相関がみられ、平均建物階数と地表面温度の間には、建物階数が高くなるにつれて、やや負の相関がみられる。

6.5 標高

細密数値情報の土地利用分類の山林では、特に地表面温度が低くなっている。標高が高くなるに連れて気温が低くなることは自明であり、大気温度が低くなるということは当然地表面温度にも影響を与えていると考えられる。ここでは、4節において簡単に分類した山林部における標高と地表面温度の関係を図-17に示したところ明らかに負の相関を示した。

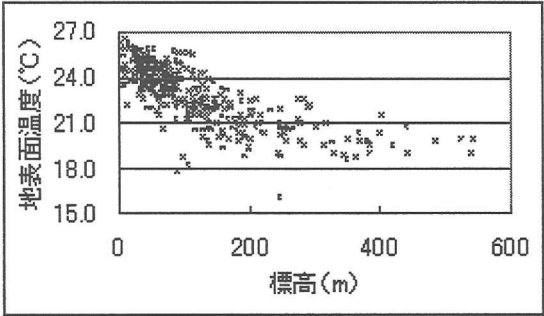


図-17 標高と地表面温度の相関

7. 影響要因による地域分類とモデル式算出

前節までの分析で、同じ土地利用分類項目、または同じ指標値において地表面温度に大きくばらつきが生じており、この原因としては、地域の特性があると考えた。そこで、本節では、分析対象地域について地域分類を行い、地域ごとに地表面温度を算出するモデル式を作成した。

7.1 地域分類

地域の大きさを1kmメッシュ（1500地域）として、地域分類を行うために、PVI、水域面積率、建ぺい率、平均建物階数、工業用地率の指標を用いクラスター分析を行った。その結果を図-18に示し、分類された地域ごとの各指標の平均値を表-3に示す。表-3の各指標値より、クラスター①を都市部、②を郊外部、③を河川・臨海部、④を山林部と命名した。

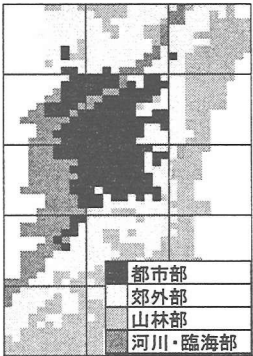


図-18 地域分類結果

表-3 各クラスターの指標値

クラスター	PVI	水域率 (%)	建ぺい率 (%)	建物階数 (階)	工業用地率 (%)
①	10.31	2.92	36.80	2.71	9.75
②	18.61	4.50	15.88	1.83	5.62
③	8.54	33.31	15.47	1.92	22.13
④	26.93	3.93	7.47	1.61	2.44

7.2 地域ごとの影響要因による重回帰分析

影響要因の複合的な効果を検討するために、重回帰分析を行った。重回帰分析結果を表-4、重回帰式による地表面温度（モデル式）と地表面温度（LANDSAT）の相関図を図-19

に示す。河川・臨海部については、重回帰分析をおこなった結果、水域面積率以外の指標については、説明変数から除外された。大規模河川や海沿いについての分析は今後の課題として検討が必要である。その結果、都市における平均建物階数の回帰係数は負の値となり建物の影の影響を

表4 重回帰分析結果

都市部	平均	地表面温度との単相関係数	地表面温度との偏相関係数	偏回帰係数	標準回帰係数	重相関係数	寄与率
PVI	10.31	-0.37	-0.43	-0.25	-0.32	0.856	0.732
水域面積率	2.92	-0.47	-0.48	-0.09	-0.31		
建ぺい率	36.80	0.47	0.20	0.02	0.14		
平均建物階数	2.71	-0.53	-0.64	-0.58	-0.47		
工業用地率	9.75	0.45	0.53	0.06	0.34		
郊外部	平均	地表面温度との単相関係数	地表面温度との偏相関係数	偏回帰係数	標準回帰係数	重相関係数	寄与率
PVI	18.61	-0.75	-0.44	-0.14	-0.46	0.821	0.673
水域率	4.50	-0.27	-0.38	-0.08	-0.25		
建ぺい率	15.88	0.58	0.10	0.02	0.08		
工業率	5.82	0.46	0.31	0.05	0.20		
標高	40.22	-0.62	-0.21	-0.01	-0.19		
山林部	平均	地表面温度との単相関係数	地表面温度との偏相関係数	偏回帰係数	標準回帰係数	重相関係数	寄与率
PVI	26.93	-0.72	-0.41	-0.12	-0.35	0.843	0.711
水域率	3.93	0.33	-0.12	-0.03	-0.07		
建ぺい率	7.47	0.63	0.14	0.03	0.11		
工業率	2.44	0.51	0.18	0.06	0.12		
標高	118.08	-0.75	-0.54	-0.01	-0.47		

都市部	平方和	自由度	F値	有意水準
回帰	276.33	5	55.27	
残差	101.17	198	0.51	
全体	377.50	203		108.2
郊外部	平方和	自由度	F値	有意水準
回帰	975.6	5	195.1	
残差	473.1	566	0.8	
全体	1448.7	571		233.4
山林部	平方和	自由度	F値	有意水準
回帰	961.20	5	192.2	
残差	391.10	358	1.1	
全体	1352.29	363		176.0

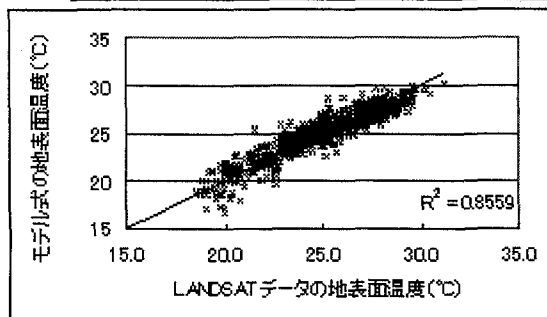


図-19 地表面温度の実測値と予測値の分布

受けていると考えられる。また、都市部、郊外部、山林部を合わせた、分析の精度を表す重相関係数は 0.93 と高く、精度の良い地表面温度推定のモデル式を作成できた。

8.まとめと今後の課題

本研究では、都市の熱環境問題を広域的に評価するために、大阪の実証研究として、LANDSAT-TM データの一つである地表面温度データを用い、都市全体の熱環境の実態を把握し、さらに地表面温度と密接に関係する土地利用や各種都市活動指標を用いて詳細に分析を行った結果、大気温度の影響を考慮して、地域分類された地域ごとに地表面温度を算出するモデル式を作成した。得られたモデル式の精度をさらに向上するためには、土地利用に関する精度の高いデータが必要不可欠になるが、現状では都市全体で整備されている細密数値情報による土地利用データや LANDSAT-TM データから得られる情報に限界がある。今後の課題として、LANDSAT-TM データにおけるマクロ的な分析結果と実測研究におけるミクロ的な分析結果を考慮した研究が必要であると考えている。

参考文献

- 1) (財) リモート・センシング技術センター (1990.10) : 地球観測データ利用ハンドブックランドサット編・改訂版
- 2) R.R.NEMANI and S.W.Running (1988) : Estimation of Regional Surface Resistance to Evapotranspiration from NDVI and Thermal-IR AVHRR Data
- 3) A.J.Richardson, C.L.Wiegand(1977):Distinguish vegetation from soil background information, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol.43, No.12, pp1541-1552
- 4) 大阪府 (1997) : エコ・エネ都市システム技術導入効果の調査研究平成9年度調査報告

LANDSAT-TM データを用いた地表面温度とその影響要因に関する分析

石丸 裕史**・西村 昂***・山本 勝彦****

近年の環境問題の中でも、都市の熱環境は様々な規模で問題を引き起こしている。これは、都市化の進展に伴い、地表面のコンクリート化の進行、緑の減少など都市構造の変化や、人工廃熱の増加などにより、ヒートアイランド現象が出現することが要因となっている。本研究では、都市の熱環境を広域的に評価するために、LANDSAT-TM データの一つである地表面温度データを用い、都市全体の熱環境の実態を把握し、さらに地表面温度と密接に関係する土地利用や各種都市活動指標を用いて詳細に分析を行った結果、地表面温度を算出するモデル式を作成し、そのモデル式から緩和対策の効果の可能性を検討した。

Analysis on the Ground Surface Temperature and its Influence Factors based on LANDSAT-TM Data*

By Hiroshi ISHIMARU**, Takashi NISHIMURA*** & Katsuhiko YAMAMOTO****

Recently, heat pollution in urban area is becoming dominant in the urban environmental problems. As for this, this heat island phenomenon is considered to be caused by the urban development due to the change in the urban structure, increase in artificial waste heat, the progress of concretize of the ground surface and decrease of green open space so on. In this study, the actual condition of the whole heat environment of the city was grasped by using the surface of the earth surface temperature data which were one of the LANDSAT-TM data to evaluate the heat environment of the city from the viewpoint of wide area, and various city activities indexes are used, the land use which influences the surface of the earth surface temperature closely in detail analysis go result model-type surface of the earth surface temperature calculate, and the possibility when a relaxation countermeasure was done from the model-type was examined.