オブジェクト分類手法による詳細土地被覆情報の取得と地表面温度の再現性に関する研究

大西 暁生^{1*}・前崎 隆一²

¹東京都市大学環境学部環境創生学科 (〒224-8551 神奈川県横浜市都筑区牛久保西3-3-1)

²公務員 (〒920-0271 石川県河北郡内灘町鶴ヶ丘2丁目677番地)

* E-mail: onishi@tcu.ac.jp

都市部では、郊外と比べ熱環境が悪化するヒートアイランド現象が問題となっている。その一つの要因として、都市内部の土地被覆が大きく関わっている。とりわけ、コンクリートやアスファルトといった人工的な被覆が増加することによって熱環境が悪化している。そのため本研究では、近年注目されているオブジェクト分類手法を用いて詳細土地被覆情報を取得するとともに、その精度の検証を現地の情報と照らし合わせて行い、従来のピクセルベースの分類手法によって得られた結果と比較することでその精度の高さを示す。さらに、熱環境が悪化する夏季の昼間を対象に、土地被覆割合が地表面温度に与える影響を通常の回帰分析 (OLS: Ordinary Least Squares) とGWR (Geographically Weighted Regression, 地理的加重回帰法) によって明らかにする。そしてここで得られた関係式を用いて地表面温度を推計することによって、その再現性をASTER衛星画像の地表面温度と比較することで検証する。

Key Words : land cover classification, fine land covers, land surface temperature

1. はじめに

都市内部の熱環境が郊外部に比べ悪化するヒートアイランド現象が著しくなっている。この原因の根幹は、自動車やエアコンなどからの人工排熱、高層ビル群による風の流れの変化や滞留、都市特有の建築物の高密度化といった地域特性、そして水域や緑地といった自然的な土地被覆の減少並びにアスファルトやコンクリートといった人工的な土地被覆の増加があげられている。このような問題を緩和するため、今まで様々な対策が打ち出されてきた。人工排熱の要因については、住宅、オフィスなどでの空調、自動車の運転および工業生産のための電気、ガス、油などのエネルギー消費により、最終的には熱として大気へ放出されることでヒートアイランド現象を助長している¹⁾。こうしたエネルギー消費に伴う排熱をヒートアイランドの「二次破壊系要因」²⁾とし、鳴海ら³⁾は都市における人工排熱 (廃熱) が都市熱環境に及ぼす影響に関して検討を行っている。現在では、自動車から鉄道やバスといった公共交通機関へのモーダルシフトや、省エネ製品の普及も広い意味では人工排熱の対策の一つである。地域特性の要因として、例えば東京では多くの

中小河川が暗渠化され、改修されて水面の占める割合が大きく減っていることから、水面からの蒸発による気化熱の効果も弱まっている⁴⁾。そのため、都市開発によって地下に埋められてしまった用水路や小川を復活させ、水の流れ、風の流れを取り戻すことを目的とした事業が国内外の都市、例えば韓国ソウル市の清溪川⁵⁾などで行われている。しかし、上記の対策には補助金や建設費といったコストがかかる恐れがある。そこで一般的に注目されているのが土地被覆の緑化である。コンクリート建造物やアスファルト舗装道路で覆われた都市の地表面は、森林・草地や田畑・裸地が主体の郊外田園地帯とは、熱容量・熱伝導などの熱的特性、および蒸発効率や反射率・射出率などの放射特性が異なる⁶⁾。そのため、人工被覆を緑地に置き換えることによって、もともとの人工被覆による日射エネルギーの吸収と放射熱が抑えられると同時に、植物を配置することによって蒸発散が促進され、これによって昇温抑制効果も得られる。また、樹木などの背の高い植物によって緑化すれば、その影により日陰の効果も得られ、これによって都市の熱環境を緩和する効果が得られる。東京都では2001年から「東京における自然の保護と回復に関する条例 (自然保護条例)」

に基づき、1,000m²以上（公共施設は250m²以上）の敷地において、建築物を新築又は増改築などの時に、敷地と建築物上（屋上・壁面・ベランダなど）に緑化を義務付け、緑の回復を行っている⁹。他の自治体も屋上緑化などの義務化をはじめ、例えば2002年に兵庫県⁹、2006年に大阪府⁹、2007年に京都府⁹、2008年に名古屋市の「緑化地域制度」⁷などの事例がある。この事業には助成金が出されるなど、緑化が徐々に推進されている。その他にも、屋根などに高反射率塗料を塗布するなどの研究⁹が行われることで対策が進み、熱環境の緩和が促進されている。本研究の対象地域である富山市では、市民の新たな交通手段として2006年4月からLRT（Light Rail Transit）が富山ライトレールとして運行している。全国各地でもLRTは運用され、軌道敷内に緑地を設置する工夫が多く存在する。このように、都市内の緑地の被覆率を上げていこうとする取り組みが実施されている。そのためまず、都市内部に点在する緑地などの土地被覆を詳細且つ正確に把握する必要がある。

従来の衛星画像であるLANDSATなどを用いて、土地被覆や土地利用と気温または地表面温度との関係を分析した研究として、天野・中川¹⁰、渡辺ら¹¹、円満・尾島¹²がある。ただし、LANDSATなどの衛星画像の解像度は数十mと粗く、近年では前述したような微細な緑地などの状況を詳細に把握する目的から、高分解能な衛星画像が用いられはじめています。そのため、筆者ら^{13,18}、Onishi *et al.*¹⁹、廣田ら²⁰、Cao *et al.*²¹、吉川ら²²、上野・井村²³は高分解能衛星画像の一つであるIKONOSを利用し、詳細な緑地や土地被覆を取得する手法を検討し、これを熱環境の解析に応用してきた。特に、IKONOSから取得した土地被覆とLANDSATやASTERから得られた地表面温度（LST: Land Surface Temperature）の関係を統計的な手法である重回帰分析（最小二乗法）（OLS: Ordinary Least Squares）などによって把握してきた。この手法は、地表面温度と土地被覆の関係を簡便に把握するには有用な手法である。しかし、このような手法を用いて得られる地表面温度に対する各土地被覆の影響度合いを表す係数は、観測地点において一定と仮定した平均的な傾向を表すものである。また、熱収支式などの物理的な方法によって地表面温度や気温を再現する場合にも、各地点の特性を表わすパラメータを地点の特徴を加味して変えない限り、算出される気温へのパラメータの影響は空間的に一様となる。そのため、筆者ら²⁴は従前の研究^{17, 19}で得られた詳細な樹木や草地といったデータと名古屋市の都市計画基礎調査の土地利用データを組み合わせることによって、地域の空間的な特性を加味することができる新たな統計的な手法であるGWR（Geographically Weighted Regression, 地理的加重回帰法）を熱環境の解析に試みてきた。また、

Buyantuyev and Wu²⁵は、筆者らと同様の視点を持ち、地表面温度と土地の特性の関係をGWRを用いて分析している。また、熱環境の解析ではないが、奥岡ら²⁶は名古屋市を対象に、神社や緑地といった環境資源要素の価値をOLSとGWRによって分析している。ただし、従前の研究ではIKONOSによる分類が、従来のピクセルベースで行っていたことや、GWRを分析に用いた場合にもIKONOSから利用したのは樹木と草地のみであったことなど多くの課題が残された。

そのため本研究では、熱環境の原因となる土地被覆を詳細に取得するため、既存のピクセルベースである教師なし分類手法、教師あり分類手法、エキスパート分類手法ではなく、比較的新しい分類手法として近年利用されはじめているオブジェクト分類手法を用いる。そして、このオブジェクト分類手法を用いて得られた土地被覆の結果の精度検証を現地の情報と照らし合わせて行うと同時に、我々が以前に行ったピクセルベースの結果²⁷と比較することによってその精度の高さを示す。さらに、この土地被覆分類の結果を用いて、熱環境が悪化する夏季の昼間における地表面温度との関係を明らかにする。その際、OLSだけではなく、観測地点の距離を重み付けとするGWRを用いることによって地域固有の係数を得る。最終的には、これら異なる関係式を用いて地表面温度を推計し、その違いをASTER衛星画像の地表面温度と比較することでその再現性を検証する。これによって今後、詳細且つ精度の高い土地被覆の情報を取得する方法を提示するとともに、その地表面温度との関係を把握するための新たな方法を示す。

2. 使用データと対象地域

土地被覆分類で使用した衛星画像は、高分解能衛星の一つであるIKONOS画像である。IKONOSは、米国の偵察衛星技術を用いて造られたものであり、撮影したい場所を的確に捉えることができるとともに、周回衛星のため時間変化に伴う土地被覆の遷移などを把握することができる。最大の特徴は、分解能が1mと高いこと（衛星画像の1ピクセルが地上の距離の約1mに相当すること）である。これによって、従来の衛星では判別することが困難であった街路の樹木や一般住宅の庭木など面積の小さい緑地を把握することが可能となる。ただし、IKONOSのセンサは可視域の青・緑・赤と、近赤外の4つのバンドで構成されており、例えば一般によく利用されるLANDSAT（ETM+は8バンド）と比較しても、利用できる波長域は狭くなっている。そのため、地表面温度画像で使用したのはASTER衛星のものである。ASTER

は、可視光から熱赤外までの14バンドを有しており、本研究で使用した地表面温度以外にも地表面放射率や地表面反射率といった様々な地表面の情報が整備されている。ASTERの分解能はプロダクトにより異なるが、ここで用いた地表面温度画像の分解能は約90mである。

本研究の対象地域は、使用したIKONOS画像に合わせ、富山市の中心部を含む経度 $137^{\circ} 09' 49'' \sim 137^{\circ} 13' 42''$ 、緯度 $36^{\circ} 39' 46'' \sim 36^{\circ} 42' 09''$ であり、その範囲は $5,773\text{m} \times 4,430\text{m}$ となっており、面積は 25.57km^2 である。撮影日時は、2006年8月1日午前10時59分（JST：Japan Standard Time、日本標準時）の画像である。ASTERについては、範囲をIKONOSに合わせて用いている。撮影日時は、2010年8月30日10時45分（JST）である。

3. 詳細土地被覆情報の取得

(1) 既存の土地被覆分類手法

現在、一般的に用いられる土地被覆分類手法として、ピクセルベースの教師なし分類手法、教師あり分類手法、エキスパート分類手法がある。また最近では、土地被覆をグループとして扱うオブジェクト分類手法が広く利用されはじめている。筆者ら²⁰⁾は、すでに富山市のIKONOSを用いて、ピクセルベースによる3つの分類手法を行い、詳細な土地被覆分類情報を取得している。そして、これら3つの取得結果について精度検証を現地の情報と照らし合わせて行っている。次章では本研究におけるオブジェクトベースの分類結果と現地の情報を照らし合わせることで精度検証を行うとともに、上記の既存研究の結果と比較することでその精度の高さを示す。以下にピクセルベースの分類手法について補足として説明を簡単に加えておく。

教師なし分類手法とは、任意のクラス数をあらかじめ設定することにより、コンピュータが自動的にクラスターリングする手法であり、最終的に各クラスと土地被覆分類項目（クラス）を対応づける手法である²⁰⁾。

教師付き分類手法とは、現地調査などで得られた現地の土地被覆の情報（トレーニングデータ＝教師データ）を用いて分類する手法である²⁰⁾。例えば、現地において緑地と判明した地点のトレーニングデータをもとに、この教師データのスペクトル特性を判別し、類似したスペクトル特性をもつ土地被覆を同様に緑地として分類していく手法である²⁰⁾。

エキスパート分類手法は、各土地被覆項目のトレーニングデータからスペクトル特性を判読し、各土地被覆項目の特性を分類の一つの条件（ルール）として加えて設定し分類するものである²⁰⁾。教師付き分類手法よりも

詳しくスペクトルの特性を読み取って行うため、教師付き分類手法で発生した誤分類項目を正しく分類することができる²⁰⁾。しかし、上記の3つの分類手法はピクセルベースで分類を行うため、ゴマ塩状の微小な誤分類（微小領域）が多く発生する問題がある。そのため本研究では、前述したオブジェクト分類手法を用いて、さらなる精度向上を試みる。ピクセルベースにおける分類の説明の詳細と得られた結果については、我々の論文²⁰⁾を参考にされたい。

(2) オブジェクト分類手法

ピクセルベースにおける分類手法は、微小領域と言われるゴマ塩状の誤分類が発生し、分類精度の低下につながる。そのため本研究では、この問題を解決するため、オブジェクト分類手法を用いて改善を試みる。この分類手法の特徴は、分類対象をオブジェクトとみなすため微小領域が発生せず、分類結果の被覆の境界が明確になることが挙げられている。

この手法は、はじめにスケールレベル（オブジェクトサイズのパラメータ）を決定し、マージレベル（微小なオブジェクトを統合するパラメータ）を決定する。スケールレベルによりオブジェクトの大きさが決定できるが、スケールレベルが小さい場合はオブジェクトは小さく均質性が高いものになり、他方、スケールレベルが大きい場合はオブジェクトは大きく均質性が低下する²⁰⁾。マージレベルでは、スケールレベルで分割されたオブジェクトを結合することを意味し、この値が大きければ、広い近隣の範囲で同じ特性を持つオブジェクトを結合する²⁰⁾。

ここでは、森林や河川といった大きなオブジェクトから、住宅の屋根といった小さいサイズのオブジェクトまで発生するため、スケールレベルを28.0、マージレベルを40.2に設定した。設定方法としては、オブジェクトを何度か作成し直し、設定した11項目の土地被覆分類に最も適合するパラメータを試行錯誤的に見つけた。オブジェクト分類手法には、ルールベースの分類手法と教師付き分類の手法があるが、ここでは後者を用いた。教師付き分類の手順は前述のピクセルベースのものと同様であり、現地調査などから得られた情報をもとに、オブジェクトを選択し分類クラスを割り当てた後に分類を実行した。

最終的なオブジェクト分類による対象地域全体の分類画像及び富山城、布瀬南、陸上競技場の分類画像を図-1に示す。また、対象地域全体の土地被覆面積割合を図-2に示す。

(3) 精度検証とピクセルベースの結果との比較

ここでは、本研究で行ったオブジェクト手法による分

対象地域全体

富山城

布瀬南公園

陸上競技場

凡例	水域	影域	水田	畑	樹木	草地
	土壌	アスファルト	コンクリート	瓦屋根	金属	

図-1 オブジェクト分類による画像

類結果を現地調査で確認した実際の土地被覆と照らし合わせることで精度検証を行う。検証方法はランダムに165地点を選定し、現地調査を行い実際の土地被覆を把握した。そのポイントデータと結果画像を重ね合わせて検証する。また、我々が以前に行ったピクセルベースの結果²⁷⁾と比較することによってその精度の高さを示す。表-1に、精度検証の結果を示す。

得られた結果として、全体精度を見ると、教師なし分類、教師付き分類、エキスパート分類、オブジェクト分類の順に精度が向上しており、オブジェクト分類手法の全体精度が84.24%と、ピクセルベースの中でも最も精度が高かったエキスパート分類結果と比べて10%近く精度が向上していることが分かった。とりわけ、樹木の精度が94.12%と非常に高いことが分かる。また、エキスパー

図-2 対象地域全体の土地被覆面積割合

表-1 精度検証の結果

分類手法 \ 分類クラス	水域	影域	水田	畑	樹木	草地
教師なし	66.67%	93.33%	86.67%	0.00%	46.67%	33.33%
教師あり	86.67%	86.67%	100.0%	20.00%	80.00%	26.67%
エキスパート	93.33%	75.00%	93.33%	53.33%	80.00%	86.67%
オブジェクト	93.75%	93.75%	87.50%	87.50%	94.12%	85.71%
分類手法 \ 分類クラス	土壌	アスファルト	コンクリート	瓦屋根	金属	全体精度
教師なし	46.67%	86.67%	60.00%	0.00%	33.33%	50.30%
教師あり	66.67%	100.0%	80.00%	60.00%	53.33%	69.09%
エキスパート	60.00%	93.33%	66.67%	60.00%	60.00%	75.76%
オブジェクト	81.25%	73.33%	80.00%	72.22%	76.92%	84.24%

教師なし，教師あり，エキスパートについては筆者らの論文²⁾からの再掲である。

表-2 地表面温度と各土地被覆との相関関係

	地表面温度
水域	-0.19
影域	0.61
水田	-0.36
畑	0.12
樹木	-0.55
草地	-0.22
土壌	0.00
アスファルト	0.62
コンクリート	0.52
瓦屋根	0.75
金属	0.40

ト分類と比較して，影域，畑，土壌，コンクリート，瓦屋根，金属のように飛躍的に精度が向上した被覆があるのに対して，水田，草地，アスファルトなどで精度が一部低下してしまった．これについては今後，精度の低下した被覆については，取得方法などを検討することによって精度の改善を試みる必要がある．

4. 詳細土地被覆情報と地表面温度との関係

ここでは，前章で行ったオブジェクト分類手法による土地被覆分類の結果とASTER衛星で撮影された地表面温度との関係进行分析する．分析方法としては，ASTER衛星画像の地表面温度の分解能に合わせて90mのメッシュを作成し，この各メッシュ内に含まれる各土地被覆面積割合と地表面温度との関係を見る．

(1) OLSによる土地被覆面積割合と地表面温度との関係

ASTER衛星の地表面温度画像を用いて，各土地被覆面積割合との関係性をOLSによって分析した．OLSの基本式は以下となる．

表-3 OLSによる結果

説明変数	係数	
水域	-10.56 (-16.53)	**
影域	4.25 (3.46)	**
水田	-6.04 (-9.74)	**
畑	27.22 (9.20)	**
樹木	-6.70 (-11.35)	**
草地	-1.22 (-1.80)	
土壌	-1.89 (-2.89)	**
アスファルト	3.89 (4.37)	**
コンクリート	-	-
瓦屋根	11.34 (9.50)	**
金属	-	-
定数項	39.67 (70.38)	**
R ²	0.73	
Adj.R ²	0.73	
サンプル数	2214	

**は1%有意，カッコ内はt値を示す．

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \cdots + \beta_n x_{in} + \varepsilon_i \quad (1)$$

y_i ：被説明変数， β_0 ：定数項， β_n ：推定される係数， x_{in} ：説明変数， ε_i ：誤差項， i ：各メッシュ

本研究では，説明変数を各メッシュに含まれる11項目の土地被覆面積の割合，被説明変数を地表面温度とした．また，分析を行う際に，多重共線性が発生した場合は，増減法を用いて変数選択を行った．

表-4 GWRによる結果

	Min.	1st Qu.	Median	3rd Qu.	Max.
水域	-28.83	-10.79	-4.16	3.09	44.50
影域	-75.52	-3.52	2.97	11.07	89.27
水田	-248.40	-9.96	-4.38	1.93	381.90
樹木	-37.33	-9.39	-4.85	-0.66	29.05
草地	-38.33	-5.41	-0.79	3.39	40.24
土壌	-28.88	-5.05	-1.09	3.36	40.24
アスファルト	-40.44	-2.26	2.03	6.81	41.03
瓦屋根	-37.41	1.39	6.26	12.61	61.12
金属	-70.82	-5.28	1.07	7.45	101.20
観測数	2214				
バンド幅	196.44				
R ²	0.92				

Min.(最小値), 1st Qu. (第一四分位), Median (中央値)
3rd Qu. (第三四分位), Max. (最大値)

表-2に、地表面温度と各土地被覆との関係を相関表に示す。これにより、それぞれ地表面温度に対して各土地被覆がどのような関係にあるのかを正負の相関として判定できる。

表-3に、OLSによる結果を示す。この結果、補正済み決定係数は0.73と高い関係がみられた。得られた係数は表-2の相関表と同じように、地表面温度に対して負の影響を表しているものは水域、水田、樹木、草地であり、一方で正の影響を与えているのは影域、畑、アスファルト、瓦屋根であった。コンクリートと金属は、OLSでは変数として採用されなかったが、表-2の相関表から正の関係にあることが分かる。土壌については、相関関係が顕著でないため、正負の関係が明確には分からなかった。

(2) GWRによる土地被覆面積割合と地表面温度との関係

前節では、OLSにより各土地被覆割合と地表面温度との関係を把握した。しかし、OLSでは空間的に変動する係数の空間的異質性を除外し、被説明変数と説明変数の関係を平均的な傾向として係数が得られる。そこで、ここではGWRを用いて、各土地被覆割合と地表面温度との関係性を分析する。その方法は西大²⁴⁾やBuyantuyev and Wu²⁵⁾を参考にした。GWRは係数の空間的変動を考慮しており、指標や得られる相関関係の持つ地域的意味の適切な理解や高い予測精度のモデルの作成に役立つ。このモデルの特徴は、地理空間上の各地点における近隣の観測情報を部分サンプルとして局所的に重み付けを行うものである²⁴⁾。GWRの基本式は以下のように表すことができる。

$$W_i y = W_i X \beta_i + \varepsilon_i \quad (2)$$

y: 被説明変数, X: 説明変数の行列, ε_i : 誤差項, W_i :

図-3 GWRの概念図

則内²⁶⁾の論文を参考に作成

空間的重み行列

GWRは、OLSの基本式に座標系を組み込んだ拡張モデルである。 β_i は観測地点*i*における要素数*k*-1の回帰係数ベクトルである³⁰⁾。 β_i は次式で表すことができる。

$$\hat{\beta} = (X'W_i^2 X)^{-1} (X'W_i^2 y) \quad (3)$$

また、観測地点からの距離に応じて変動させる重み付け行列 W_i は、ガウス型の距離低減関数を用いた次式で表すことができる。

$$W_i = \exp(-(d_i / \theta)^2) \quad (4)$$

d_i : 観測地点*i*から他の観測地点までの距離, θ : 最適バンド幅 (パラメータ)

最適バンド幅 θ は距離低減関数において唯一のパラメータである。なお、最適なバンド幅を探索する方法としては、次式で与えられるクロス推計 (The Cross-Validation (CV) Score) 法が提案されている^{24) 31)}。これは、観測地点*i*の推定値を、この観測地点*i*を除いた周辺サンプルにおけるその他の観測地点データを利用して推計する方法であり、 θ について最小化する^{24) 31)}。本研究でも、このクロス推計法を用いた。図-3にGWRの概念図を示す。

表-5 土地被覆項目ごとの係数の出現数と分布

	水域	影域	水田	草地	樹木	土壌	アスファルト	瓦屋根	金属
-30 ≤ β < -20	0	65	109	8	5	0	9	5	54
-30 < β ≤ -20	63	56	45	38	50	12	28	19	60
-20 < β ≤ -15	202	42	87	97	114	41	42	12	58
-15 < β ≤ -13	163	27	122	52	130	38	19	16	54
-13 < β ≤ -10	191	68	187	73	199	77	43	16	85
-10 < β ≤ -7.5	187	88	233	101	263	145	58	27	107
-7.5 < β ≤ -5	228	112	251	223	326	250	124	78	160
-5 < β ≤ -2.5	199	163	258	302	352	333	207	116	196
-2.5 < β ≤ 0	193	211	220	338	306	360	311	153	228
0 < β ≤ 2.5	188	221	194	330	245	309	327	237	244
2.5 < β ≤ 5	183	225	125	249	109	242	303	295	211
5 < β ≤ 7.5	123	186	75	137	48	138	243	259	208
7.5 < β ≤ 10	82	150	50	80	22	109	156	242	128
10 < β ≤ 12.5	74	118	38	49	16	79	88	180	85
12.5 < β ≤ 15	43	94	37	34	13	29	67	119	55
15 < β ≤ 20	29	170	37	45	11	24	93	173	71
20 < β ≤ 30	35	137	45	48	5	20	77	172	86
30 < β ≤ 40	26	55	22	8	0	7	18	66	80
40 < β ≤ 50	5	12	16	2	0	1	1	26	26
50 < β ≤ 75	0	10	9	0	0	0	0	3	12

ここで、最適バンド幅 θ は観測地点（回帰地点）ごとの勢力範囲とも言うことができ、大きいほど各観測地点のパラメータ推定で利用される近傍の範囲が広くなり、大きければなめらかなパラメータの空間変異が、小さければ凹凸の激しい局所的な区間変異が得られる³⁹⁾。一般にバンド幅が大きければパラメータ推定の際に利用するデータ量は多くなり、パラメータ推定値の信頼性が向上する一方で、パラメータ変異の空間的分解能は落ちてしまう³⁹⁾。バンド幅が小さければパラメータ変異の分解能は高く、現実のデータにより適合するものの、パラメータ推定値は統計的な信頼性に欠けたものになってしまう³⁹⁾。このスケール問題を解くため、前述のクロス推計法を用いている。

$$CV(\theta) = \sum_{i=1}^n \{y_i - \hat{y}_{\neq i}(\theta)\}^2 \quad (5)$$

表-4に、GWRによる結果を示す。この結果、OLSの結果における全体地域の重決定係数（ R^2 ）と比較すると、GWRの結果が0.92とその向上がみられる。最適バンド幅（ θ ）は約196mとなっている。中央値を見てみると、水域、水田、樹木、草地、土壌の係数が負となっているのに対し、影域、アスファルト、瓦屋根、金属は係数が正となっている。OLSによる水田の係数は負であったが、GWRの結果から水田の係数のうち25%までは正となっている。アスファルトの係数についても、OLSの結果で

表-6 地表面温度の基本統計量

	ASTER 衛星	OLS 再現	GWR 再現
平均値	38.96	39.07	38.94
標準誤差	0.08	0.07	0.07
中央値	40.25	39.80	40.25
標準偏差	3.68	3.10	3.44
分散	13.51	9.62	11.86
最小	25.85	29.32	27.01
最大	47.55	44.79	44.90

表-7 地表面温度の相関係数

	ASTER LST	OLS LST	GWR LST
ASTER 衛星	1.00		
OLS 再現	0.85	1.00	
GWR 再現	0.96	0.92	1.00

表-8 各地点の地表面温度

	①	②	③	④
ASTER 衛星	43.80℃	47.60℃	31.50℃	37.90℃
OLS 再現	41.90℃	40.90℃	34.50℃	38.20℃
GWR 再現	43.90℃	43.20℃	32.60℃	37.60℃

はすべて正となっていたものの、GWRの結果では係数の25%までが負となっている。このことから、対象地域全体における水田の係数の傾向が概ね負であっても、地域によっては正の影響になることが分かった。

次に係数の分布をさらに詳しく見るため、土地被覆項目ごとの係数の出現数と分布を表-5に示す。水田の最大値は381.90であり、最小値は-248.40となっているが、正負の境界付近の出現数を強調するため、係数の-30以下と75以上の分布についてはここでは割愛する。下線は最

図-4 ASTER と OLS の地表面温度の比較

図-5 ASTER と GWR の地表面温度の比較

大出現数を示し、中央の点線は正負の境界を表している。この結果、全体的な傾向をみると、同じ自然的な土地被覆であっても、水域、水田、樹木などはどちらかというと負の係数が高いものが多いのに対して、草地や土壌は負の係数が低いことが分かる。とりわけ係数が負となっている自然的な土地被覆のうち、より低い係数で観測地点の最大出現数が分布しているのは水域であり、対象地域において水域の温度低減効果が高いことが示された。他方、係数が正の値で分布しているアスファルトと瓦屋根をみると、瓦屋根の係数の分布がアスファルトよりも正の値が高くなっていることが分かる。この一つの要因として、富山県では比較的高い黒色の瓦屋根が使用されていることに由来していると考えられる。

(3) OLSとGWRによる地表面温度の再現結果

ここでは、OLSとGWRの結果から導出された関係式を用いて地表面温度を再現する。まず、表-6にASTER衛星画像による地表面温度及びOLSとGWRによる地表面温度の再現結果の基本統計量を示す。これを見ると、ASTER衛星画像による地表面温度の平均値と中央値は、GWRの再現結果の方がOLSのそれより近いことが分かる。ただし、GWRによる最大と最小の地表面温度の再現結果は、ASTER衛星画像のそれと比較してその範囲が狭くなっており、これが標準偏差や分散にも表れていると考えられる。ただし、ここでもGWRの再現結果の方がOLSよりASTER衛星画像に近いことが分かる。

次に、表-7にASTER衛星画像による地表面温度及びOLSとGWRによる地表面温度の再現結果の相関関係を示す。この結果、ASTER衛星画像の地表面温度と相関

関係が強いのはOLSの再現結果よりGWRのそれであることが分かり、前述した基本統計量の結果をより明確に表していることが分かる。また、図-4にOLSの地表面温度の再現結果をASTER衛星画像による地表面温度で除したものを、同様に図-5にGWRの地表面温度の再現結果をASTER衛星画像による地表面温度で除したものを示す。この結果、ASTERの地表面温度画像と適合している地域、すなわち1.00となる地域はGWRが456（全体の20.60%）であり、OLSが241（全体の10.89%）と明らかにGWRの方が再現精度が高いことが分かる。また、GWRはOLSより1.00の前後における地域が多いのが一見して分かり、全体的に薄い色合いとなっていることが見てとれる。

次に、個別の地域の特徴を具体的に見るため、図-6に対象地域全体のトゥルーカラー画像を、図-7にASTER衛星による地表面温度画像を示す。また、図-8と図-9にOLSとGWRの再現結果を示す。図-6における左側の白円は水田地域周辺を示しているが、その周辺温度分布に着目すると、図-7では周辺から中心部へかけて地表面温度が低下していることが分かる。他方、この傾向を再現画像である図-8及び図-9と比較すると、図-8では水田地域周辺の地表面温度の高低が平滑化され、図-7のような傾向はほとんどみられない。図-9では、近接するメッシュの影響で図-7の地表面温度分布に近づいていることが分かる。また、図-7、図-8、図-9の①、②、③、④の地点での地表面温度をそれぞれ比較したものを表-8に示す。①、②、③地点ではOLSに比べGWRによって再現された地表面温度が実際の地表面温度に近いことが分かる。他方、④地点については実際の地表面温度がGWRとOLSの中間の値となり、地域によっては必ずしもGWR

図-6 ツールカラー画像

図-7 地表面温度画像（ASTER 衛星）

図-8 地表面温度画像（OLS の結果）

図-9 地表面温度画像（GWR の結果）

の再現性が高いとは言えない場合があることが示唆された。しかし、温度分布の傾向や表-6～8の結果からも分かるように、全体的には地域ごとに係数を決定していくGWRによる再現性がOLSよりも圧倒的に高いことが明らかになった。

5. おわりに

本研究では、熱環境の原因となっている土地被覆の情報をできる限り詳細に取得するため、既存のピクセルベースの分類手法ではなく、新たな分類手法として近年利用されているオブジェクト分類手法を試みた。そして、このオブジェクト分類手法を用いて得られた詳細な土地被覆の結果を現地の情報と照らし合わせることによって精度検証を行った。さらに、従前の我々のピクセルベースによる分類結果と比較することによってその精度の高

さを示した。さらに、得られた土地被覆分類の結果と夏季の昼間における地表面温度との関係を明らかにするため、通常一般に用いられるOLSの手法に加えて、地理的に固有の係数を得ることができるGWRを用いることによって地域の特徴を加味した関係式を導出した。最終的には、これら異なる結果によって再現された地表面温度と、ASTER衛星画像の地表面温度を比較することによって、GWRによる再現性の高さを示した。これによって本研究では、精度の高い詳細な土地被覆の情報を取得する方法を提示するとともに、地表面温度を再現する新たな手法を示した。

今後の課題を以下にまとめる。

- 1) オブジェクト分類手法は1オブジェクトあたりにおいて面積の小さな瓦屋根や住宅地に発生する影域などで誤分類が発生する可能性がある。こうした改善には、スケールレベルやマージレベルの設定などを厳密に行う必要がある。ただし、研究の目的に応じ

て精度高く取得したい土地被覆を中心に設定を行う必要があり、この点を踏まえて慎重にレベルの設定を行う必要があると考えられる。

- 2) 今回、富山市の中心市街地を対象にしたが、ここで得られた結果が地域固有の特徴なのか、もしくはどの地域でも同様の結果がみられるのかは分からない。そのため、出来る限り多くの地域で分析を行うことで分類手法及び統計的な手法の汎用性についても十分に考慮していきたい。
- 3) 本研究では、GWRを用いることで地域によって得られる係数が異なることを示し、地表面温度の再現性が通常のOLSよりも高いことを示した。しかし、この係数の違いが土地被覆以外の他の要因、例えば植生の活性具合や地形起伏などに起因している可能性があり、今後はこれらの要因を明らかにする必要がある。これによって地表面温度を形成している土地被覆以外の要因を知ることによって熱環境を緩和していくための方策を考える上で重要な情報となり得ると考えられる。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金（26340104、代表：大西暁生）と環境省の環境研究総合推進費（3K143015、代表：田畑智博）の支援により実施された。また、査読者から貴重なご意見を頂いた。ここに記して、深謝する。

参考文献

- 1) 足永靖信，李海峰，尹 聖皖：顕熱潜熱の違いを考慮した東京 23 区における人工排熱の排出特性に関する研究，空気調和・衛生工学会論文集，NO.92，pp.121-130，2004.
- 2) 尾島俊雄：暑くなる大都市，NHK ブックス，1975.
- 3) 鳴海 大典，大谷 文人，近藤 明，下田 吉之，水野 稔：都市における人工廃熱が都市熱環境に及ぼす影響—都市熱環境評価モデルを用いたヒートアイランド現象の改善策に関する検討 その1—，日本建築学会計画系論文集，No. 562，pp.97-104，2002.
- 4) 三上岳彦：都市のヒートアイランド現象とその形成要因：東京首都圏の事例研究，地学雑誌 114（3），pp. 496-506，2005.
- 5) 松本太，一ノ瀬俊明，白木洋平，李龍太：都市内河川の大規模復元による「風の道」の効果に関する気候学的研究—韓国ソウル市清溪川を事例として—，日本生気象学会雑誌，Vol.46，No.2，pp.69-80，2009.
- 6) 山口隆子：屋上緑化の推進に向けて，予防時報，245，pp. 14-19，2011.
- 7) 名古屋市「緑化地域制度について」
<http://www.city.nagoya.jp/ryokuseidoboku/page/0000008169.html>.
- 8) 近藤 靖史，小笠原 岳，大木 泰祐，有働 邦広：建物屋根面の日射反射性能向上によるヒートアイランド緩和効果，日本建築学会環境系論文集 Vol. 73，No. 629，pp.923-929，2008.
- 9) 近藤 靖史，長澤 康弘，人交 麻衣子：高反射率塗料による日射熱負荷軽減とヒートアイランド現象の緩和に関する研究，空気調和・衛生工学会論文集，No. 78，pp. 15-24，2000.
- 10) 天野 智順，中川 敬介：ランドサットデータを用いた都市域の気温と土地被覆との関連性，富山県立大学紀要 17，pp. 108-113，2007.
- 11) 渡辺 浩文，依田 浩敏，尾島 俊雄：リモートセンシングデータと数値情報利用による広域都市の地表面温度分布図の作成に関する研究，日本建築学会計画系論文報告集，No. 443，pp. 21-29，1993.
- 12) 円満 隆平，尾島 俊雄：気象衛星による市街地熱環境調査：リモートセンシングによる都市空間の構造解析（その2），日本建築学会論文報告集，No. 334，pp. 101-108，1983.
- 13) 大西暁生，廣田福太郎，吉川拓未，森杉雅史，井村秀文：高分解能衛星画像を用いた詳細土地被覆情報と輝度温度との関係—緑地の特性に着目して—，環境システム研究論文集，Vol. 31，pp. 357-365，2003.
- 14) 大西暁生，松浦未央子，森杉雅史，井村秀文：LANDSAT ETM+ 画像におけるヒートアイランド現象の把握とIKONOS 画像を用いた特殊空間緑化の熱環境緩和効果に関する研究，環境共生学会審査付研究発表論文，Vol. 10，pp. 92-102，2005.
- 15) 大西暁生，森杉雅史，林良嗣，井村秀文：詳細土地被覆情報を用いた土地利用別ヒートアイランド緩和効果に関する研究，環境の管理，Vol. 61，pp. 23-35，2006.
- 16) 大西暁生，森杉雅史，村松由博，井村秀文，林良嗣：愛知県豊田市における詳細土地被覆情報の取得と熱環境解析への適用に関する研究，地球環境研究論文集，pp. 181-190，2008.
- 17) 大西暁生，曹鑫，森杉雅史，奥岡桂次郎，井村秀文：名古屋市中心地における空閑地緑化による都市熱環境緩和効果，都市計画報告集，No. 8-4，pp. 176-180，2010.
- 18) 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，pp. 149-158，2011.
- 19) A. Onishi, X. Cao, T. Ito, F. Shi and H. Imura: Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots, Urban forestry & Urban greening, Vol. 9 (4), pp. 323-332, 2010.
- 20) 廣田福太郎，大西暁生，森杉雅史，井村秀文：高分解能衛星を用いた都市内緑地分析に関する研究，環境システム研究論文集，Vol. 30，pp. 91-99，2002.
- 21) X. Cao, A. Onishi, J. Chen and H. Imura: Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data, Landscape and urban planning, Vol. 96, pp. 224-231, 2010.

- 22) 吉川拓未, 廣田福太郎, 大西暁生, 森杉雅史, 井村秀文: 都市域の熱環境解析のための詳細土地被覆情報に関する基礎的研究. 環境システム研究論文発表会講演集, 31, 591-597, 2003.
- 23) 上野賢仁, 井村秀文: 名古屋市域を対象とした高分解能衛星画像による土地被覆と衛星輝度温度の解析. 環境システム研究論文発表会講演集, Vol.32, pp.537-542, 2004.
- 24) 大西暁生, 奥岡桂次郎, 石峰, 森杉雅史: 地理的加重回帰法を用いた緑地の熱環境緩和効果の季節・空間特性の把握, 都市計画報告集, No.9-3, pp.93-97, 2010.
- 25) Buyantuyev, A., Wu, J. : Urban heat islands and landscape heterogeneity: linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns. *Landscape Ecology*, Vol. 25, pp.17-33, 2010.
- 26) 奥岡桂次郎, 大西暁生, 谷川寛樹, 白川博章: 歴史的景域の経済的評価に関する研究 - 名古屋市における神社周辺の緑地のヘドニック・アプローチ -, 土木学会論文集 G (環境), Vol. 67 No. 5, 地球環境研究論文集第 19 巻, pp.I_273 - I_279, 2011.
- 27) 大西暁生, 前崎隆一: 富山市中心市街地における詳細土地被覆情報取得のための分類手法の比較・検討, 東京都市大学横浜キャンパス紀要, Vol. 1, pp.53-62, 2014.
- 28) 越智士郎: 画像オブジェクトに基づく高分解能衛星画像での土地被覆分類手法の検討, 東南アジア研究, Vol. 46, No.4, pp.578-592, 2009.
- 29) 王文君, 岸田忠大, リュウ・ウェン, 山崎文雄: 空中写真を用いたオブジェクト指向の建物被害手法の検討, (社) 日本リモートセンシング学会第 52 回 (平成 24 年度春季) 学術講演会, 2012.
- 30) 谷村 晋 (著), 金 明哲 (編集): 地理空間データ分析 (R で学ぶデータサイエンス 7), 共立出版, pp.157-160, 2010.
- 31) 大庭哲治, 柄谷友香, 中川大, 青山吉隆: 京町家集積による外部効果の空間特性に関する研究, Vol. 60-4, pp.481-482, 2005.
- 32) 則内良太: 地理的加重回帰モデルを用いた住宅価格の形成要因に関する研究, 九州大学大学院修士論文, 2008.
- 33) 杉浦 芳夫 (編): 地理空間分析 (シリーズ・人文地理学 3) 第 3 版, 朝倉書店, pp.157-160, 2010.

(2014. 3. 22 受付)

Acquiring of Fine Land Covers Information by Using the Object Based Classification Method, and Examination of Reproducibility of Land Surface Temperature

Akio ONISHI¹ and Ryuichi MAEZAKI²

¹Faculty of Environmental Studies, Tokyo City University

²Public officer

The problem of heat environment in urban area has become more obvious recently. One of the causes of this problem relates to the urban land covers. Especially, artificial land surfaces such as concrete, asphalt and so on have been expanded under urbanization and have made the problem more worsen continuously. Therefore, this study firstly acquired the fine land cover information by using the object based classification method which has become popular recently. Then, the acquiring land cover information was verified the accuracy compared with actual land covers. Moreover, relationship between land cover information and land surface temperatures were analyzed by two different statistical methods of the ordinary least squares and the geographically weighted regression. Finally, the reproducibility of the land surface temperatures by both methods were examined.