

衛星熱画像による都市サーモフィーチャーの抽出と その温度特性の考察

巖 網 林*

Extraction of Thermal Features Using Satellite Sensed Images and Discussion of Brightness Temperature Characteristics

Wanglin YAN*

Abstract

The thermal textures of satellite sensed images, caused by homogeneity and heterogeneity of urban canopy layers, indicate the objective existence of local urban heat islands or cool islands in a city. Extracting and analyzing such textures helps us to identify the thermal environment on a community scale, and take countermeasures against urban heat islands that better suit the local context. Conventional research with satellite thermal images has paid most attention to energy exchanges between canopy layers and the above atmospheric layers in pixel-based ways, but missed features appearing on the images and the mechanism by which they are formed.

Instead of a statistical comparison of brightness temperatures and environmental conditions pixel by pixel, this study extracts thermal features from satellite sensed images by a Rater-Patch-Cluster Scheme (RPCS) and discusses their thermal characteristics on a local scale. This scheme is applied to Yokohama City with ASTER/TIR observed on October 30, 2003 to identify the spatial structure of urban heat islands and the characteristics of local thermal features in the late autumn. As a result, the following knowledge is obtained.

1) The Rater-Patch-Cluster scheme is an efficient procedure for abstracting the spatial structure of urban heat islands over a wide area, and assessing the intensities of heat islands or cool islands locally.

2) There exist significant logarithmic relationships between feature areas and local heat island intensities and significant linear relationships between feature areas and local cool island intensities. That is, the larger the area of heat islands (cool islands), the stronger the intensity of heat islands (cool islands) within a city.

3) The differences in brightness temperatures in the city were complicated by two dominant factors of urban canopy layers: land use and topographical characteristics. It was observed through the thermal image that the cold air generated by grasslands and bare land after sunset could flow down along valleys or slopes of hills so that the spatial extent of cool islands were expanded.

The above conclusions show that thermal features are important elements of the local environment, and thermal images such as ASTER/TIR were useful thermal information resources for land use planning or natural land conservation.

Key words : thermal feature, urban heat island, cool island, thermal image, GIS

キーワード : サーモフィーチャー, 都市ヒートアイランド, クールアイランド, 衛星熱画像, GIS

* 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

* Graduate School of Media and Governance, Keio University

I. はじめに

都市においては、市街地の拡大とエネルギー消費の増加が都市気候を形成し、都市ヒートアイランド(UHI)を発達させる。UHIは一般に都市中心の気温が郊外より高いことを指し、中心市街の都市的土地利用の気温と郊外の自然的土地利用の気温の差を用いて都市ヒートアイランド強度($UHII_{AT}$)を評価する(厳・三上, 2004)。しかし、土地条件や人間活動の空間的不均一性によって、都市各地においてUHIは一樣ではない。商業地と住宅地、道路とその背後、水面や都市公園とその周辺のように、キャノピー層の構造によって、様々なローカールスケールのヒートアイランド(またはクールアイランド)が形成されている(近藤・開発, 1995; Arnfield, 2003; Peterson, 2003)。

UHIを捉えるために、市街地や郊外に気象ステーションを設置して気温を観測し、気温分布とUHIを得ることが多い(三上, 1999; Mikami *et al.*, 1999)。しかし、設置できる観測ステーションは予算と労力によって数に限りがある。また、ステーションのおかれた場所によって、観測データに空間代表性または土地利用代表性のバイアスがあることも指摘されている(Oke, 1984; Peterson, 2003)。このような観測を使って等温線図や等温面図を作成しても、各地の温度特性の違いを詳細に捉えることはできない。

都市の温度情報を取得する手段として、熱赤外センサを搭載した衛星が撮影した熱画像がある。衛星熱画像は地表面の放射強度を画像ピクセルサイズで受信したデータである。そこから計算した地表面の温度は輝度温度という。また、中心市街の都市的土地利用の輝度温度と郊外の自然的土地利用の輝度温度の差は輝度温度都市ヒートアイランド強度($UHII_{BT}$)という(厳・三上, 2004)。輝度温度は衛星センサの入射角や都市表面の複雑な3次元キャノピー層の構造によって影響されるため、真の表面温度にはならない(Roth *et al.*, 1989)。それでも数10 km また 100 km を超える地域を均一の精度で一度に観測可能な温度データとしては、地域の温度特性を考える上で欠

かせない存在となっている。

衛星熱画像の空間解像度はセンサによって異なる。1970年代の実験機 HCMM は 600 m の解像度を有した(Short and Stuart, 1982; Price, 1979, 1986)。そのあとに現れた AVHRR はセンサ直下で 1.1 km, 2000年代の Terra/MODIS も 1.0 km の精度である。AVHRR や MODIS は大陸スケールで一日に2回データを取得できるため、地球規模の環境研究やメソスケールの気象研究に使われている。1980年代からランドサット/TM は 120 m, 2000年代から ASTER/TIR は 90 m, ランドサット/ETM¹⁾ は 60 m の解像度で熱画像を取得することができる。

高解像度熱画像の出現は都市気候の観測と分析に新たな可能性をもたらしている(Voogt and Oke, 2003)。過去20年の間に衛星熱画像の性質や使い方に関する議論(Roth *et al.*, 1989)、輝度温度と地上気温との対応に関する検証(近藤ほか, 1997; 厳・三上, 2002)、輝度温度と緑地量との関係の分析(入江・平野, 1995, 1999)、ヒートアイランド強度の評価(厳・三上, 2004)、気温シミュレーションモデルへの入力条件としての利用(Carlson, 1986; Hall *et al.*, 1992)など、様々な行われている。これらの研究は画像ピクセルを単位とし、都市キャノピー層とその上空の大気層との間のエネルギー交換を検証することに視点がおかれ、高解像度の熱画像にみられる模様(サーモテクスチャー)に着目して解析されることはこれまでなかった。

衛星熱画像上のサーモテクスチャーは観測時刻における都市キャノピー層の放射強度の同質性と異質性によって形成されたもので(Quattrochi and Goel, 1995)、輝度温度ヒートアイランド(またはクールアイランド)の客観的存在を意味している。そのようなサーモテクスチャーは気候条件によって変化するだろうが、キャノピー層の構造や立地条件によって強く規定されるため、一定の気候条件のもとでは、定常的に現れるものと考えられる。UHI対策ではそういった特徴のある地域を重視することが求められている(東京都, 2004)。ヨーロッパでは都市の気候条件をクリマ

アトラスに編集し、マスタープランと地区計画に、気候区分を表すクリマトープを記入することになっている（日本建築学会，2000; Svensson and Eliasson, 2002）。日本においても兵庫県川西市（鳴海ほか，2002）や長野市（岩井ほか，2002）を対象に地域の気候特性を生かした街づくりを目指して、都市気候環境マップを作成する研究が進められている。しかし、これらの研究は局地的な気温観測をもとにしており、衛星熱画像から広い都市域にわたって均一の精度でローカルな情報を解析するには至っていない。

クリマアトラスは気候条件の同質領域を空間実体として認めて、クリマトープまたはパッチとして処理することを意味する。これはメッシュやピクセルを単位とした従来の都市気候研究の手法と異なる。同質領域をパッチで扱うことは景観生態学の基本手法である（Riitters *et al.*, 1995）。ここでは、パッチの抽出や属性の評価、また空間関係の解析などがよく行われるため、ベクトルベースの地理情報システム（GIS）は欠かせないツールとなっている。

衛星熱画像にみられるサーモテクスチャーには衛星センサの性能、都市キャノピー層の構造、観測時の気象条件などの要因が影響している。それらをパッチとして抽出し、その幾何学特性や空間構造を分析すると、ランドスケープレベルでUHIの分布や土地利用／土地被覆との対応などを研究し、都市計画レベルでUHI対策を検討する際に情報を提供することができると考えられる（Quattrochi and Luvall, 1999）。

そこで、本稿は衛星熱画像上のサーモテクスチャーをフィーチャーとして抽出し、GISを用いてそれらが代表するローカスケールのヒートアイランド強度（ $UHII_{BT}$ ）／クールアイランド強度（ $UCII_{BT}$ ）を計算して、立地条件や面積規模の影響を考察することを目的とする。

II. 研究方法

1) サーモフィーチャーの特性

GISでは同質領域を空間実体として認めて、エンティティという。エンティティはポイント、ラ

イン、ポリゴンによって表現され、データベースにおいてフィーチャーとして管理される。フィーチャーの抽出は、つまり、画像データ（または実地調査データ）からエンティティの位置・形状・属性・機能を定義することである（蔵，2003）。

サーモフィーチャーの「位置」は熱的特徴のある土地の立地であり、「形状」は放射特性の類似する領域のまとまりである。「属性」はフィーチャーの地理的、統計的、環境の状態を表すパラメータである。フィーチャーの温度と周辺地域の温度の違いによってサーモフィーチャーはヒートアイランドまたはクールアイランドとして評価されるが、これはすなわち、サーモフィーチャーが都市空間において果たしている「機能」である。

衛星熱画像上のテクスチャーは放射強度の近いピクセルが集まって出来たものである。それは都市キャノピー層と大気層との垂直方向のエネルギー交換と、周辺環境との水平方向のエネルギー交換（移流）の結果である。衛星熱画像は広範囲にわたって観測するため、都市においてそのような垂直方向または水平方向のエネルギー交換の結果が各地でどのようにになっているかを同時に捉えることができる。

これまでの衛星熱画像を用いた研究はピクセルベースのデータ処理が主流であった。移流は輝度温度・気温の対応関係を攪乱する原因としてみなされ（近藤ほか，1997）、その影響を無視できる気候条件のデータを選ぶことで、移流に関する議論を避けてきた（蔵・三上，2002）。一方、地上気温観測において、公園緑地による冷気の滲み出し（Spronken-Smith and Oke, 1998; 菅原・成田，2003; 成田ほか，2004）や斜面からの冷気流（竹林ほか，2001; 竹林・森山，2002）が局地的に観測されたことはあるものの、数百平方キロメートルにも及ぶ広い都市域にわたって面的に捉えられたことはまだなかった。

本稿は都市域の温度分布を広く捉えながら、局地的なヒートアイランド／クールアイランドも考察するため、サーモフィーチャーをどのように抽出し、ローカスケールにおいてその温度特性をどのように評価するかという問題を解決しなけれ

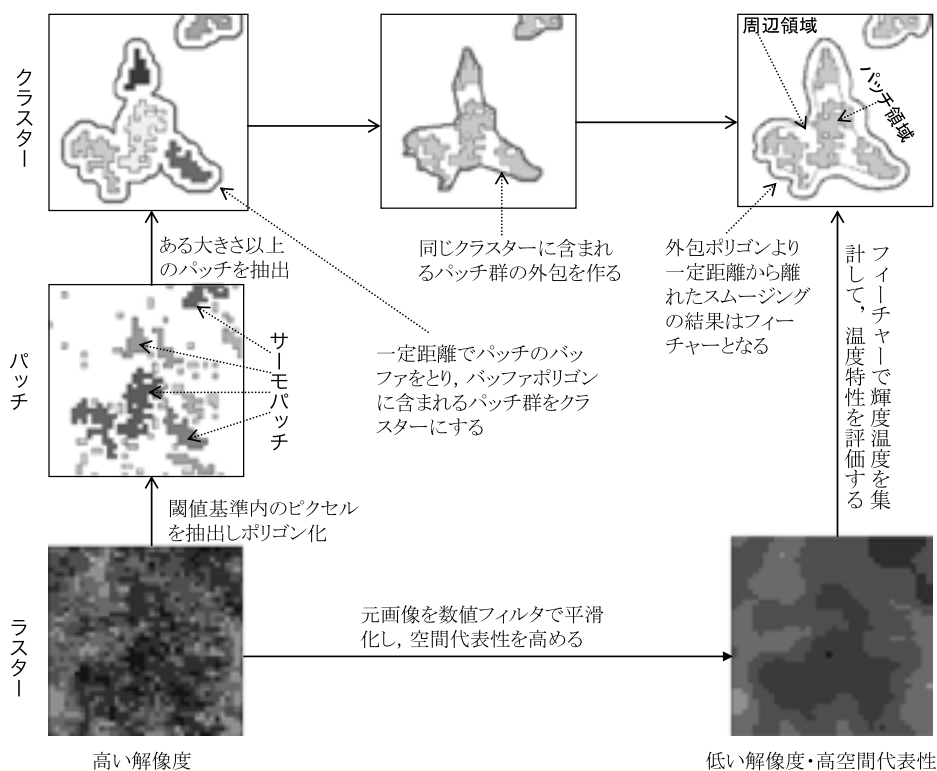


図 1 ラスター・パッチ・クラスタースキーム。

Fig. 1 Concept of raster, patch, and cluster scheme.

ばならない。これは実質的に、ベースとしての衛星熱画像をどう処理するかという問題に帰着する。

衛星熱画像は空間代表性が悪いといわれている（田宮，1995）。解像度が高いままでは輝度データにばらつきが大きく、抽出したフィーチャーが微細になりすぎて、実用的意味がなくなる。画像解像度をあまり落とすと、フィーチャーの境界精度が低下し、都市キャノピー層との対応が悪くなる。解像度を落とすということはつまり画像を平均化することであるが、それによって、熱画像の感度が落ちるものの、空間代表性は改善されることになる（巖・三上，2004）。

そこで、本稿では、熱画像の高解像度を保ったままサーモフィーチャーを抽出してから、元画像を平均化して空間代表性を高めて、サーモ

フィーチャーの温度特性を評価するラスター・パッチ・クラスタースキームを提案して、問題解決の方法を考えた。

2) ラスター・パッチ・クラスタースキーム

ラスター（Raster）・パッチ（Patch）・クラスター（Cluster）スキーム（RPCS）とは図 1 に示すように、ラスター型の画像データから同質領域をパッチとして抽出し、空間的に近接するパッチ群を 1 つのクラスターにグルーピングして、同一のクラスターに含まれるパッチ群から外包ポリゴンを生成してフィーチャーとする手法である。

衛星熱画像は都市キャノピー層の構造からの放射強度をピクセルサイズでデジタル化したものである。ランドサット/TM は 120 m，ASTER/TIR は 90 m のピクセルサイズを持っているため、熱画像にはキャノピー層のテクスチャーがはっきり

現れている。サーモフィーチャーの抽出のさいにそういったテクスチャーが失われないように、閾値条件を理論的に設定する必要がある²⁾。キャノピー層の構造は土地利用と強く関係するため、土地利用の輝度特性を参考に閾値を設定することができると考えた。

しかし、衛星センサの入射角や土地の立地によって、連続的なキャノピー層の構造が画像上で不連続にみえることがある。また、違うキャノピー層の構造が気流の移動によって、熱画像上で同じ放射輝度を呈することもある。要するに、近接するパッチ群はまとまった温度場を形成することがあることを考えると、それらをグルーピングして1つのクラスターにした方が、より大局的な視点からサーモフィーチャーを捉えることができる。

そこで、本稿では図1に示すように、同一のクラスターに属すると判定されたパッチ群に対して外包ポリゴンを生成し、スムージング処理をかけてから、サーモフィーチャーとすることにした。このようにできたサーモフィーチャーは元の熱画像の解像度を生かしながら、抽象化もされるため、輝度温度の空間代表性を改善することにもなる。

パッチ群の空間的近接性の判別に関して、景観生態学ではA)パッチ間距離、B)パッチ面積の加重距離、C)集積指数など、多くの方法がある(Riitters *et al.*, 1995)。本稿では煩雑な処理を必要としない手法A)を採用する。つまり、図1で示すようにパッチ群に一定の距離でバッファを発生させ、同じバッファポリゴンに含まれるパッチ群を1つのクラスターにする。それからグルーピングされたパッチ群ごとに外包ポリゴンを生成する。最終的に外包ポリゴンをスムージングして、サーモフィーチャーをつくることになる。

3) サーモフィーチャーの温度特性の評価

サーモフィーチャーの温度特性の評価とは、サーモフィーチャーの輝度温度統計量を計算し、その $UHII_{BT}/UCHI_{BT}$ を算出することである。輝度温度統計量はラスター画像を集計して容易に取得することができる。

ここでは、 $UHII_{BT}/UCHI_{BT}$ は都市スケールでの評価とローカルスケールでの評価に分かれる。いずれの場合も参照地点が必要になる。都市スケールの $UHII_{BT}$ は、巖・三上(2004)の場合、中心市街の都市的土地利用の平均輝度温度と郊外の自然的土地利用の平均輝度温度の差で試算した。その結果、画像解像度を500 mに落として輝度温度データの空間代表性を高めれば、 $UHII_{BT}$ と $UHII_{AT}$ はほぼ対応することが確認されている。

ローカルスケールのヒートアイランド強度とは、サーモフィーチャーが周辺地域に対して気温(輝度温度)がどれくらい高い(または低い)かということである。そのために「周辺地域」をどう定義するかという問題がある。本稿では、前述のRPCSがあるため、この問題は次のように容易に解決できる。

RPCSでは、パッチは輝度温度の同質地域として認められた領域である。パッチのまわりは周辺地域といえる。パッチ群をクラスターにまとめるときにパッチ間の異質領域が一部フィーチャーに組み込まれる。つまり、パッチ群の外包を作るときにも外包ポリゴンをスムージングするときにもパッチと異質の「周辺地域」を取り入れる。それによって、サーモフィーチャーには必ず同質のパッチ部と、異質の周辺地域部が含まれる。サーモパッチはヒートアイランドなら周辺地域の輝度温度が低いはずで、クールアイランドなら周辺地域の輝度温度が高いはずである。したがって、ローカルスケールの $UHII_{BT}/UCHI_{BT}$ はサーモフィーチャーのパッチ部の輝度温度と周辺部の輝度温度差で計算することができる³⁾。

次にサーモフィーチャーの温度特性を評価する際に利用する輝度温度データのことを考える。前にも述べたように、熱画像は解像度が高いほど、輝度温度にばらつきが大きく、 $UHII_{BT}$ は強くなる。 $UHII_{BT}$ を $UHII_{AT}$ と比較するために、巖・三上(2004)は輝度温度の画像解像度を500 mに落としていた。本稿ではローカルスケールの $UHII_{BT}$ を気温データと比較することまでは行わないが、都市スケールの評価との一致性を保つために、これまでの研究結果を継承して、熱画像を

500 m と同程度の解像度へ平均化して利用した。

以上のように、高い解像度の熱画像からサーモパッチを抽出し、サーモフィーチャーを生成する。それをもとに平滑化した熱画像を集計し、ローカルスケールの $UHII_{BT}/UCII_{BT}$ を評価することを可能にした。以下では、ASTER/TIR データを用いて横浜市に適用し、このスキームの有効性を検証する。

III. サーモフィーチャーの抽出

1) 対象地域

横浜市域を研究対象とした(図2)。横浜市は南北約 30 km, 東西約 40 km, 面積約 450 km², 人口約 350 万人を有する大都市である。横浜市域において東京湾に面する沿岸域が全部市街化されている。内陸地域にも開発が進み、農地や樹林地などが含まれる市街化調整地域は分断されている。北部から南部にかけて起伏の多い丘陵地形が発達する。土地利用でいうと(図3) 商業的土地利用は関内地区、横浜駅地区、新横浜駅地区に集中し、住宅地は沿岸域から内陸まで広く分布している。東京湾沿岸の埋立地に大型流通施設や重化学工業が立地している。また、北西部の鶴見川上流地区にも工場立地が目立つ。

横浜市におけるヒートアイランド現象に関しては、横浜市環境科学研究所が1994年から継続的に調査を行っており(佐俣, 1994, 1995, 1996, 1997, 1999, 2000)、2001年夏季に関内中心市街地において、平均 1.1 の気温 $UHII$ が観測された(佐俣, 2002)。2002年から市内 30 箇所に観測局を設置し、気温測定を続けている(福田・佐俣, 2004)。しかし、横浜市におけるヒートアイランドの空間構造や局地的なヒートアイランド/クールアイランドの分布に関しては、まだ検証されたことはない。

2) 使用データの選定

2-1) 衛星熱画像データ

横浜市域を含む夜間衛星熱画像データとして、ランドサット/TM 夜間熱画像(1990年3月1日 21時10分撮影, 解像度 120 m)(巖・三上, 2002)と ASTER/TIR 夜間熱画像(2003年10

月30日 21時50分撮影, 解像度 90 m, 処理レベル 2B03)を入手している。

表1に両画像の観測日における横浜周辺地域のアメダスデータを示した。ランドサット/TM が観測された1999年3月1日に平均風速が 3 m/sec 以上あった。昼過ぎから夜まで辻堂では南風が 5 m/sec 以上もあった。一方、ASTER/TIR が観測された2003年10月30日には、昼まで横浜局で風がやや強かったが、午後から深夜まで 3 m/sec ほどの弱風であった。南の辻堂局、西の海老名局では終日静穏に近い天候が観測された。両日とも日本列島は高気圧に覆われ、夜間に放射冷却が起こりやすかった。しかし、1999年3月1日の方が昼過ぎから朝鮮半島上空の低気圧が日本海上空に移動してきたため、南風が強まったと考えられる。

このように ASTER/TIR データの方が局地的なヒートアイランド/クールアイランドの実態を解明するのに比較的に適しているため、本稿ではそれを採用した。

ASTER/TIR は熱赤外 5 バンド、11 ビットの輝度データを提供しており、スペクトルカバレッジ、解像度、ラジオメトリック精度などの点においても、ランドサットより優れている(JPL, 2001)。ASTER プロジェクトは絶対温度 0.1 単位 16 ビット整数値のデータ(処理レベル 2B03)を提供している(Gillespie *et al.*, 1999)。このデータは処理レベル 2B01 の放射量データに大気補正と処理レベル 2B04 の放射率をかけて作られたため、使用に当たってこれらに関する前処理はしなかった。

2-2) 補助データ

横浜全域について1997年都市計画基礎調査(1/2500 デジタル地形図)から土地利用データを作成した。元土地利用データには3大分類、100に近い小分類が定義されている。本稿では、輝度温度平均値と標準分散を参考に、輝度温度分布の類似する土地利用をまとめて低層住宅地、中高層住宅地、商業業務地、工業用地、公共施設、幹線道路、運営施設、屋外利用、特殊施設、農地、樹林、水面、裸地および海面、計 14 の範疇

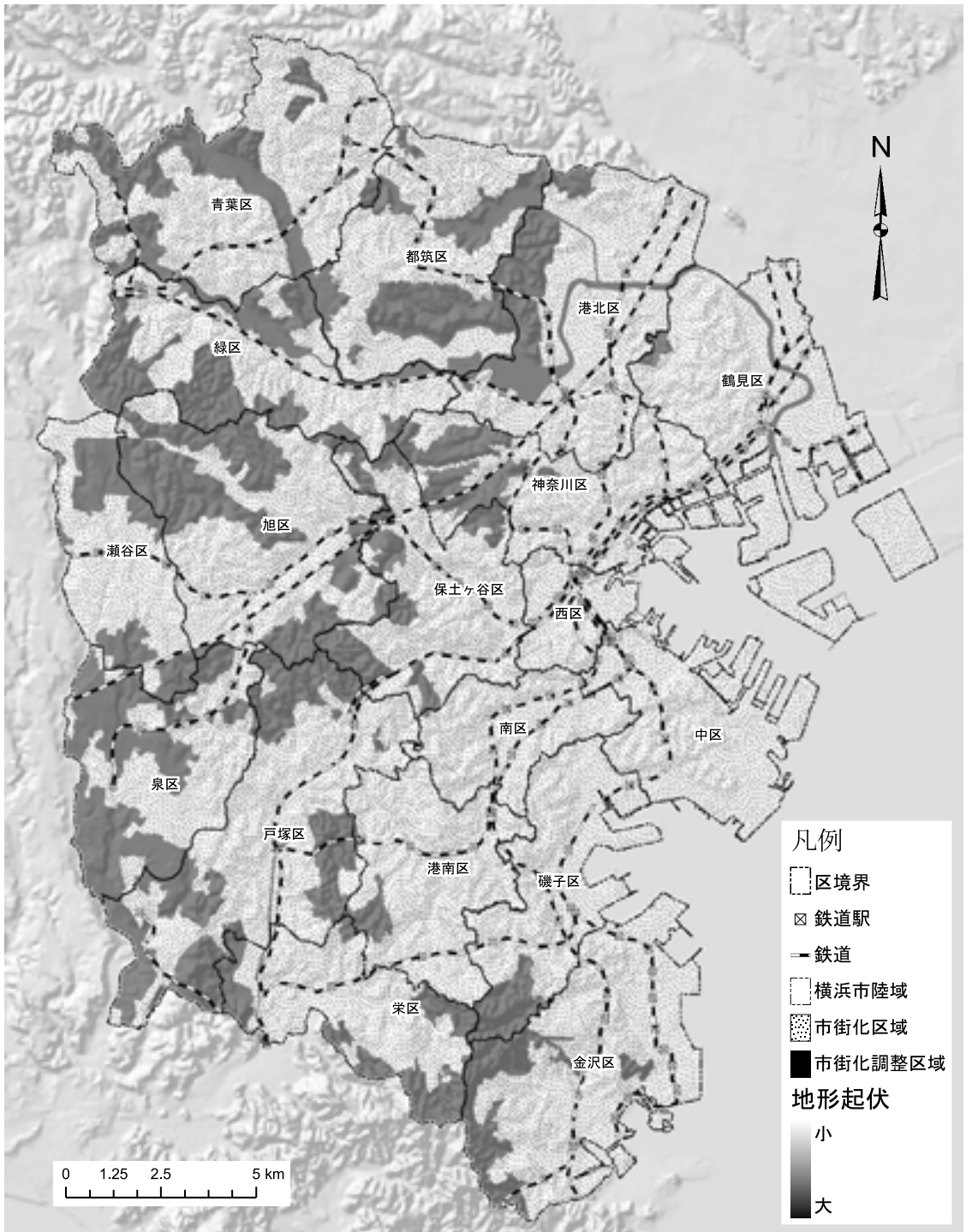


图 2 研究对象地域（横浜市）.
Fig. 2 Study area (Yokohama City).

表 1 衛星熱画像観測日の天候条件（アメダスデータ）

Table 1 Climatic conditions on days of thermal images were observed (AMeDAS data)

1999 年 3 月 1 日, Landsat/TM (Path/Raw: 205/209) 撮影日

地点 名称	気温 ()			時間帯別風向・風速 (単位: m/s)							日照 時間
	平均	最高	最低		1 4	5 8	9 12	13 16	17 20	21 24	
横浜	8.4	14.6	3.1	風向	北	北	北東	南	南	北西	7.9h
				風速	4.0	4.1	2.1	3.7	3.4	3.0	
辻堂	8.6	14.6	2.5	風向	北北東	北北東	北, 南	南南西	南南西	北	8.7h
				風速	3.5	3.8	2.5	4.8	6.5	2.0	
海老名	7.2	14.6	1.0	風向	北	北	南東	南	南南西	北	8.4h
				風速	2.3	1.3	1.5	3.8	3.0	0.8	

2003 年 10 月 30 日, ASTER/TIR (Granule ID: ASTL1A 0310301248130311140188: 東京/0189: 横浜) 撮影日

地点 名称	気温 ()			時間帯別風向・風速 (単位: m/s)							日照 時間
	平均	最高	最低		1 4	5 8	9 12	13 16	17 20	21 24	
横浜	17.4	23.4	13.0	風向	北北西	北	北	南東	南西	北	10.2h
				風速	3.3	1.6	3.6	3.1	2.7	3.1	
辻堂	16.5	21.6	11.3	風向	北	北	南西	南西	南西	北東	9.7h
				風速	1.3	1.3	1.5	2	1.5	1.5	
海老名	15.2	23.3	8.9	風向	静穏	北	北北西	南南西	静穏	北北西	9.5h
				風速	0	0.8	1.3	2.3	0	0.8	

に集約した（図 3）。また、国土地理院の数値地図 50 m メッシュ（標高）を使って地形起伏を示す陰影図を作成した（図 2, 図 3）。2002 年 8 月 10 日付けの ASTER/VNIR で正規化植生指数（NDVI）を算出した。

3) ラスターデータのパッチ化

パッチ化の閾値を決めるために、衛星熱画像の放射スペクトルを土地利用別に集計して表 2 に示した。横浜市の土地利用と輝度温度について以下の特徴を読み取ることができた。

（1）低層住宅地が全市域の 32.2%，中高層住宅地が 8.9% を占めている。両土地利用の輝度温度が市域平均値より低い。農地は全市の 7.9% を占め、最も低い輝度温度を持っている。

（2）特殊施設は 6.5% を占め、輝度温度値が最も高く、分散も大きい。市内の最高温度や最低温

度がこの土地利用に現れている。重化学工業などの特殊用地に大型の熱供給施設や冷却施設が存在し、局地的な高温域と低温域を作り出している。

（3）商業用地、工業用地、公共施設、幹線道路、運営施設を合わせて 19.3% を占め、輝度温度は全域平均値よりやや高い。

以上のことから、横浜市では農地や低層住宅地がクールアイランドを、商業用地、公共用地、幹線道路はヒートアイランドを形成していると推察できる。サーモパッチを抽出する際に、このような土地利用の構造が崩れないように閾値を設定すべきであると考えた。

そこで、特殊施設用地に現れる高温域をホットスポット、低温域をクールスポットとする。平均温度場より高い温度域をヒートパッチとし、低い温度域をクールパッチとして定義した。

表 2 土地利用別輝度温度スペクトルと NDVI .

Table 2 Brightness temperature spectrum of land use and NDVI.

土地利用	面積 (ha)	割合 (%)	輝度温度 ()					NDVI
			最小	最大	較差	平均	σ	平均値
低層住宅	14022.0	32.2	10.9	19.0	8.1	14.2	0.9	143.5
中高層住宅	3884.8	8.9	10.5	20.2	9.7	14.4	0.9	136.3
商業業務	2303.7	5.3	10.3	21.5	11.2	14.6	1.1	125.3
工業用地	1454.7	3.3	10.6	21.6	11.0	14.6	1.2	129.7
公共施設	3027.1	7.0	7.6	30.2	22.6	14.6	1.4	139.0
幹線道路	634.4	1.5	9.0	23.0	14.0	14.6	1.4	123.3
運営施設	959.6	2.2	8.7	31.3	22.6	14.6	1.7	120.6
屋外利用	5050.0	11.6	7.8	27.2	19.4	14.7	1.9	146.9
特殊施設	2813.8	6.5	5.6	40.8	35.2	14.9	2.3	123.6
農地	3446.3	7.9	8.2	26.5	18.3	14.0	2.0	164.8
樹林	4122.4	9.5	9.2	23.4	14.2	14.7	1.9	201.1
水面	821.4	1.9	9.5	27.4	17.9	16.2	2.8	153.8
裸地	1012.4	2.3	10.0	23.8	13.8	18.6	2.8	172.3
海面	5243.3		0.0	26.3	26.3	20.8	2.1	111.2
陸上全部	43552.6		5.6	40.8	35.2	14.5	1.5	

表 3 サーモパッチの定義と抽出基準 .

Table 3 Definitions of thermal patches and thresholds for their extraction.

パッチ	定義	判定基準		閾値	
ホットスポット	人工的排熱源に起因する局所的高温域	輝度温度	$\mu + 3\sigma$	輝度温度	18.94
ヒートパッチ	都市的土地利用の集積による高温域	$\mu + 3\sigma >$	輝度温度 $\mu + \sigma$	18.94 $>$	輝度温度 16.0
クールパッチ	自然的土地利用による低温域	$\mu - 3\sigma$	輝度温度 $> \mu - 3\sigma$	13.06	輝度温度 > 10.12
クールスポット	人工的冷却施設に起因する局所的低温域	輝度温度	$\mu - 3\sigma$	輝度温度	10.12

μ : 横浜市陸地部の平均値 (14.53) σ : 同地域の標準偏差 (1.47)

具体的には、平均温度場は全陸地域の輝度温度平均値 $\pm 1\sigma$ 以内として定義した。平均温度場より 3σ 以上 (以下) の高温域 (低温域) をホットスポット (クールスポット) とした。 $1\sigma \sim 3\sigma$ の温度域をヒートパッチ、 $-3\sigma \sim -1\sigma$ の温度域をクールパッチとした。以上のサーモパッチの定義と判定基準を表 3 にまとめた。

4) サーモパッチのクラスター化

ここまで抽出されたサーモパッチは数が多く、形状も複雑であって、このままでは利用ににくい。そこで、前述した RPCS を利用して、空間的に近接するパッチ群に対して、外包ポリゴンを生成し、スムージング処理をかけてサーモフィーチャーをつくった。

「空間的に近接する」ことの判定に関しては次

表 4 抽出されたサーモフィーチャーの統計。

Table 4 Extracted thermal features.

フィーチャー	数	サーモフィーチャーの面積 (ha)			
		合計	最小	最大	平均
ホットスポット	73	2158.65	0.81	498.15	29.98
ヒートフィーチャー	216	6667.11	1.62	1044.09	31.01
クールスポット	31	707.94	12.96	160.38	23.60
クールフィーチャー	28	8060.31	56.70	1342.17	298.53

のように考えた。都市気候では緑地は夏季に周辺地域へ冷気を滲み出すことがあり、その距離は 80 ~ 90 m と報告されている (菅原・成田, 2003; 成田ほか, 2004)。それが本稿で使う ASTER/TIR にも現れているとすれば、1 ~ 2 ピクセル程度のことである。逆にいえば、2 ピクセル以上離れるサーモパッチは別の温度場を形成すると思われる。そこで、サーモパッチの周辺地域もフィーチャーに取り入れる必要があることを考慮し、同一の温度場と考えられるサーモパッチの隣接距離を 150 m に設定した。データ処理は GIS において以下の手順で行った。

(1) サーモパッチに対して 150 m の距離でバッファポリゴンを生成する。ただし、ホットスポットとクールスポットは特殊施設が存在が大きいいため、面積と関係なく、すべてのパッチを対象とした。ヒートパッチとクールパッチに関しては面積が 1 ha 以上のものをコアパッチとして、バッファの対象とした。

(2) バッファポリゴンに含まれるサーモパッチ群に同一のクラスター ID を与える。その ID をもつパッチ群を外包するポリゴンを生成する。

(3) 外包ポリゴンに対してスムージング処理をかけてサーモフィーチャーとする。図 1 に示したように、外包ポリゴンではバッファ距離を除いたが、スムージング処理の際にそれを復元している。それは形によらずにサーモフィーチャーには必ず周辺地域が含まれるように配慮したからである。

(4) 最後にサーモフィーチャーの周囲長や面積などを計算する。

以上の処理で作成したホットスポット、クールスポット、ヒートフィーチャー、クールフィーチャーを図 4 に示す。また、抽出されたサーモフィーチャーの数や特徴を表 4 にまとめた。クールフィーチャーとその番号を図 3 にもプロットした。

5) サーモフィーチャーの輝度温度差の評価

サーモフィーチャーには輝度温度として同質のサーモパッチと、異質の周辺地域が含まれている。これを利用してサーモフィーチャーの温度特性を以下の手順で評価した。

(1) $UHII_{BT}$ が排熱施設や冷却施設によって大きくゆがめられないように、サーモフィーチャーに含まれる特殊施設によるホットスポットの領域、クールフィーチャーに含まれる特殊施設によるクールスポットの領域を除外した。

(2) 解像度 90 m の ASTER/TIR 画像を 5×5 の数値フィルターで平滑化し、450 m 解像度でリサンプリングし、空間代表性を高めた。

(3) 450 m 解像度の輝度温度データに対して、サーモフィーチャーの輝度温度の最大値、最小値、較差、平均値、標準偏差を求めた。

(4) サーモフィーチャーの最大値と最小値の差をとり、ローカルのヒートアイランド/クールアイランドの $UHII_{BT}/UCHI_{BT}$ をそれぞれ算出した。

以上によって抽出されたサーモフィーチャー及びその温度特性は GIS によって管理されているため、どのフィーチャーに対しても、その輝度温度の特性を検索し、検証することができる。

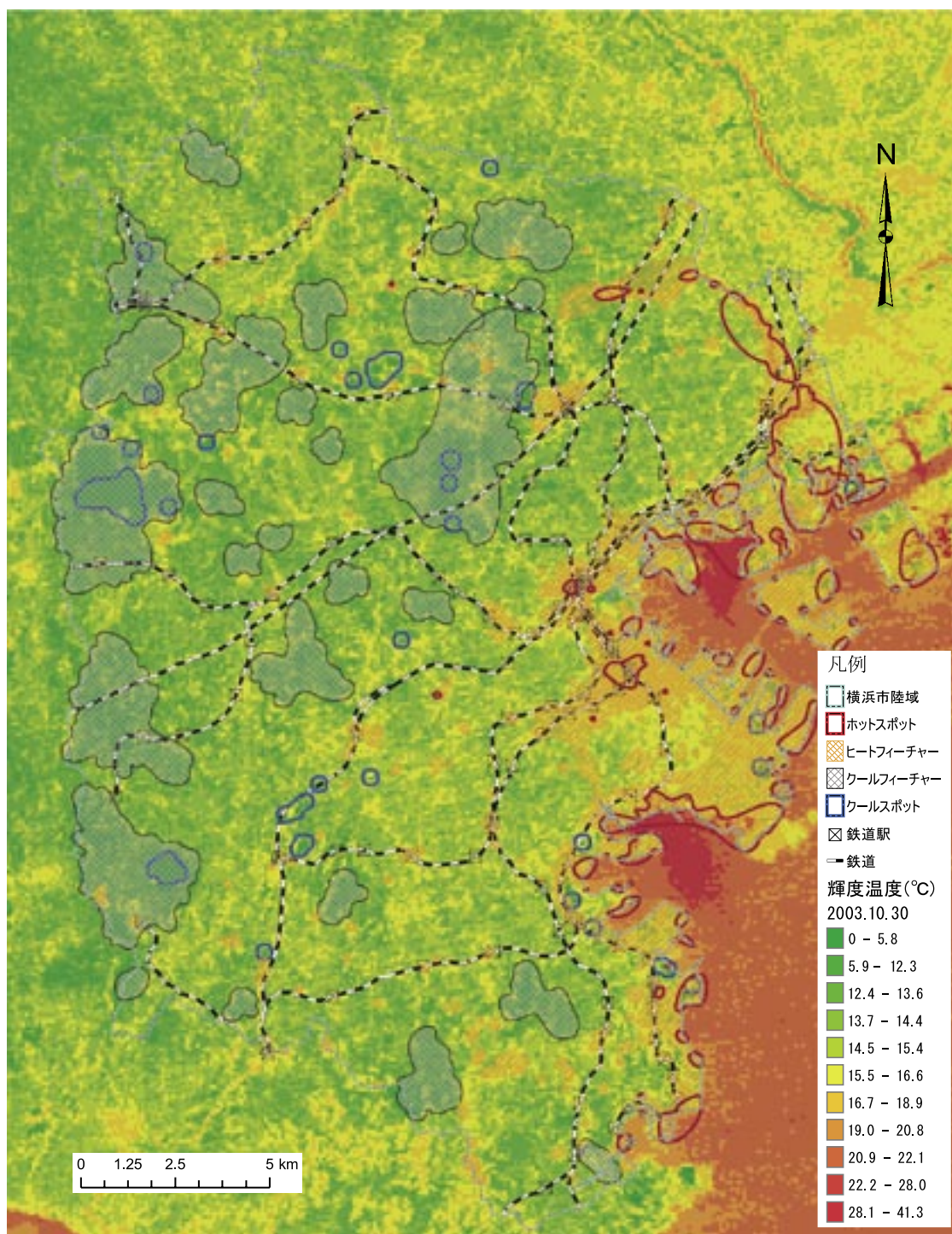


図 4 抽出されたサーモフィーチャー .

Fig. 4 Extracted thermal features in Yokohama City.

IV. 考 察

サーモフィーチャーの温度特性はキャノピー層の構造、人工排熱、気候条件の複合的影響によって形成される。キャノピー層の構造に関しては、本来人工的・自然的な地盤および被覆物による3次元空間を扱わなければならないが、ここでは便宜上、おもに地形と土地利用を考慮する。人工排熱に関しては工業排熱・生活・商業業務排熱・交通排熱などを考慮しなければならないが、その影響は土地利用に含まれているとする。気候条件に関しては 章で述べたように局地的移流の影響を考える。

1) サーモフィーチャーの立地分布と都市構造

1-1) ホットスポット

ホットスポットは全 73 箇所のうち、工業的土地利用に 25 箇所、海域に 17 箇所ある。図 4 に示す立地分布を見ると、重化学工業が集積する沿岸域に多くみられる。ごみ焼却所が立地する地点は、排熱によるホットスポットとして認められた。鶴見川や海域は熱容量の大きい水体として、晩秋に高温域となっている。関内地区と横浜駅前地区は都市集積の高い地区としてホットスポットとなっている。

したがって、ホットスポットには工業施設型と都市集積型の 2 種類があることがわかった。前者は沿岸工業地帯に分布し、後者は商業業務中心地に現れている。都市集積型は典型的な UHI として、輝度温度は市域平均値より 3σ も高くなっている。

1-2) クールスポット

クールスポットは沿岸工業施設(特殊施設用地)に認められ、NDVI が低いいため、冷却施設によって形成された可能性が高い。一方、クールスポットは内陸部にもみられ、土地利用は農地、樹林、低層住宅地が殆どであって、放射冷却によってクールフィーチャーが作られたことがわかる。

つまり、クールスポットにも工業施設型と自然型の 2 種類がある。横浜市において、前者は沿岸工業地域に分布し、後者は郊外の自然的土地利用に現れている。自然型のクールスポットは都市

クールアイランドとして、輝度温度は市全域平均値より 3σ も低くなっている。

1-3) ヒートフィーチャー

大規模なヒートフィーチャーは関内地区、横浜駅地区、新横浜駅地区に現れた。小規模なものは郊外地域の鉄道駅周辺や道路インターチェンジに分布している。商業・業務的土地利用の集積がヒートアイランドの発達をもたらしたことが確認された。

1-4) クールフィーチャー

クールフィーチャーは内陸部と南部に認められた。図 3 に示しているように、土地利用では農地と裸地が優占し、NDVI が高くない。植物被覆の少ない農地と裸地は日没後に放射冷却が速く進み、クールアイランドを形成したと考えられる。ただし、金沢区の森林地域は、閉鎖的な樹冠が放射冷却を遅らせたため、輝度温度は高く、ヒートフィーチャーとして抽出された。同様な現象は冬季のランドサット/TM 画像にも認められた(巖・三上, 2004)。また、菅原・成田(2003)が2000年夏に新宿御苑で行った観測にも類似の結果がみられた。つまり、夜間に冷気が生成されたのは空に対して開けた、長波放射収支がマイナスとなる面であることを、ASTER/TIR 画像からも確認された。

以上によって、ヒートフィーチャーは高密度市街地において、クールフィーチャーは農地、裸地において現れた。高度に集積した商業地は熱も集積し、ホットスポットとなる。規模の大きい郊外農地や裸地は強いクールアイランドを発達させることが認められた。

2) サーモフィーチャーの面積と輝度温度差との関係

抽出されたサーモフィーチャーは周辺地域に対してどのぐらいのヒートアイランド/クールアイランド強度を持っているか、すでに 章で計算されている。ここで、その結果を利用して、サーモフィーチャーの規模とヒートアイランド/クールアイランド強度との間にどのような関係があるかを調べ、結果を図 5a, b に表した。

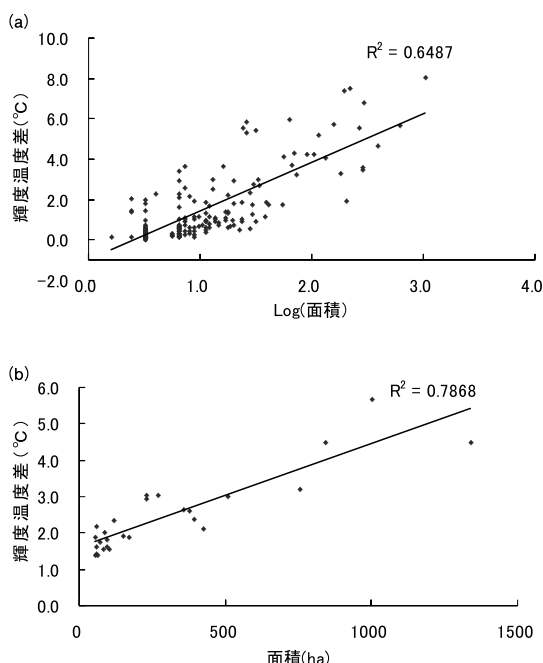


図5 ヒートフィーチャー/クールフィーチャーの面積と内部輝度温度差の関係。

- (a) ヒートフィーチャーの面積（対数）と内部輝度温度差の関係。
 (b) クールフィーチャーの面積と内部輝度温度差の関係。

Fig. 5 Relationship between heat feature (cool feature) area and its local differential of brightness temperatures.

- (a) Relationship between log (heat feature area) and its local heat island intensity.
 (b) Relationship between cool feature area and its local cool island intensity.

2-1) ヒートフィーチャー

都市規模の拡大はヒートアイランドの発達をもたらすといわれている（菅原，2001）。都市の人口規模とヒートアイランド強度との間に対数関係が成り立つことも昔から報告されている（Oke, 1973）。近藤ほか（1993）は関東平野の諸都市を対象に、ランドサット/TMを用いて都市内外の輝度温度差を算出した結果、人口集中地区(DID)の人口や面積と国土数値情報の建物用地Aの面積との間に正の相関があることを指摘した。しかし、都市内部における各地域のヒートアイランド

またはクールアイランドに関して具体的に検証された事例はない。

図5aに示しているようにヒートフィーチャーの $UHII_{BT}$ はフィーチャーの面積との間に、対数関係がみとめられた。ヒートフィーチャーは都市中心部や鉄道駅前といった都市集積の高いところに出現していることから推察すると、その都市的土地利用の増加がヒートアイランドの面的拡大をもたらすとともに、集積度の増加によってヒートアイランド強度を拡大させたと考えられる。つまり、都市内部のそれぞれの集積地域を小都市とみなせば、近藤ほか（1993）が指摘した都市規模と $UHII$ との関係は都市内部に対しても、適用できることが認められた。

2-2) クールフィーチャー

都市においてはヒートアイランドとともに、クールアイランドが存在することも知られており、公園緑地を中心に観測と検証が行われている（Spronken-Smith and Oke, 1998; 成田ほか，2004）。また、都市キャノピー層の不均質性によって、道路沿いの高層建築物と、それに囲まれた街区内部の低層建築物との間に温度分布のドーナツ構造ができていることも指摘されている（近藤・開発，1995）。しかし、公園緑地は規模や形態が多様であり、キャノピー層の構造も複雑なため、それらの研究ではクールアイランドの規模と効果に関して、一般的な知見を見出すまでには至っていない。

本稿では、図5bに示しているように、クールフィーチャーの面積と輝度温度差との間に顕著な線形関係が認められた。クールアイランドは農地、裸地、自然の多い低層住宅地に現れている。そのような自然度の色彩の濃い土地の面積が大きいほど冷却効果が強い。その結果、クールアイランドが大きくなり、周辺地域との間に大きな温度差を生み出したと考えられる。このことから、フィーチャー内外の温度差で自然的土地利用によるヒートアイランドの緩和効果を評価するとしたら、小さいものよりも大きいものの方が効果的であるといえよう。

ヒートフィーチャーとクールフィーチャーは面

積と輝度温度差との対応関係に、それぞれ対数関係と線形関係の違いが認められた。このことに関しては、現段階ではまだ十分に説明できないが、ヒートフィーチャーとクールアイランドはそれぞれ対応する都市キャノピー層の構造が異なり、それによってエネルギー交換プロセスにも違いがあったのではないかと考えられる。

3) サーマフィーチャーの形成原因について

3-1) ヒートフィーチャー

前項でも述べたように、中心市街地のヒートフィーチャーは人工排熱の多いホットスポットに匹敵するほどの UH_{BT} があった。それは一般的に建物の集積による放射とエネルギー消費による人工排熱が影響していると考えられる。エネルギーの消費でいえば、普通冷暖房の利用の影響が大きいと考えられるが、ASTER/TIR の観測日である 2003 年 10 月 30 日は最低気温 13.0、最高気温 23.4、平均気温 17.4 とあって、普通に冷房も暖房も必要のない時期であった。

また、ヒートアイランドは規模が大きいほど、周辺地域への影響も大きいと考えられる。しかし、静穏な天候において、ヒートアイランドでは暖かい空気が上昇するため、周辺地域へ流れることは少ないと考えられる。上昇気流の下に冷たい空気が入るとしても、局地的なヒートアイランドの規模や強度に影響するほど強くないだろう。

以上のことから、ヒートフィーチャーは主として人工的建造物が集積する都市キャノピー層の放射特性によって形成されたといえよう。

3-2) クールフィーチャー

クールフィーチャーの場合、状況はかなり違う。章でも触れたように都市内部の公園緑地は周辺地域に冷気を滲み出すことがある（菅原・成田, 2003）。しかし、その距離は 80 ~ 90 m ほどしかないため、90 m 解像度の ASTER/TIR では容易に確認することができない。

本稿で抽出したクールフィーチャーのなかには農地、低層住宅地、樹林が優占している。これらの土地利用はクールフィーチャーの中でまばらに分布するものもあれば、固まって配列しているものもある。たとえば、図 3 の 16 の下部や 19 の

上部のようにクールアイランドが住宅地にはみ出ていることがうかがえる。これは冷気流の働きではないかと考えられる。

山地や丘陵地では日没後に冷気塊が斜面に沿って下へ流れ、谷底や盆地に堆積して冷気湖を形成する現象があることはよく知られている（近藤, 2000; 堀口ほか, 2004）。都市においても後背山麓で生成された冷気が 1 km ほど離れた谷口市街地まで低温効果をもたらしたとの報告もある（竹林ほか, 2001; 竹林・森山, 2002; 鳴海ほか, 2001）。さらに新宿御苑のような規模が大きく、なかには土地被覆や地形変化のある公園においても、芝生面で生成された冷気が斜面にある樹林地を通して池周辺の低地へと流下する現象が観測されている（成田ほか, 2004）。このような斜面冷気流や冷気湖の現象と効果は HCMM の時代から衛星熱画像によって捉えようと努力していたが、600 m の解像度では市街地に発生する小規模のものに適用することはできなかった（Gossmann, 1986）。

この現象は本稿の ASTER/TIR 画像において表れ、クールフィーチャーとして捉えられた。つまり、クールアイランドの形成において、土地利用による放射冷却の差異と地形による冷気の移動が同時に働いたと考えられる。このことは図 3 の地形陰影図にプロットしたクールフィーチャーから考察することができる。また、クールフィーチャー内の標高差は大きいところで 70 m、低いところで 20 m あり、冷気流を生ずるための高低差が十分にあると思われる。

3-3) クールフィーチャーに対する土地利用の影響

クールフィーチャーには自然的土地利用・低層住宅地が優占する。図 3 の 11, 12, 14, 17, 18 は緩やかに傾斜する台地上にあり、フィーチャーの規模は小さく、自然的土地利用と低層住宅地がまばらに混在しているようにみえる。NDVI を調べた結果、そこは作物被覆の少ない農地または裸地となっている。このような条件では日没後、放射冷却がもっとも速く進むため、一帯が冷え込み、住宅地も含めてクールアイランドとなったと考えられる。

3-4) クールフィーチャーに対する地形による 冷気流の影響

図3の1, 2, 3, 4, 5, 7は谷底にあって、自然的土地利用が中央に、都市的土地利用が兩岸の斜面に配列されている。6, 8, 9, 10, 13, 16, 19は斜面にあり、自然的土地利用は斜面の上部、都市的土地利用は斜面の下部にある。このような土地利用と地形の配列では、クールフィーチャーの形成において土地利用、植生被覆、地形との間に次のような関係があると考えられる。1, 2, 3, 4, 5, 7のようにフィーチャー内の自然的土地利用によって谷底に冷気がたまる。同時に上流からも冷たい空気が流れ下り、これによってクールフィーチャーが拡大され、両側の斜面または近くの市街地まで冷気が滲み出たと考えられる。6, 8, 9, 10, 13, 16, 19では、斜面上部の自然的土地利用によって冷たい空気が生成され、それが斜面に沿って谷底へ移動し、斜面下の市街地を冷やして、クールフィーチャーを拡大したことが読み取れる。

このように衛星熱画像によって地域のヒートアイランドまたはクールアイランドを空間的に特定することができた。また、自然的土地利用が地域に存在するとしても、立地条件や地形条件によって周辺地域に与える影響が異なることを、広域にわたって空間的に検証することができた。

V. 結 論

本稿は、ラスター・パッチ・クラスタースキーム(RPCS)を用いて、ラスター型の衛星熱画像にみられるサーモテクスチャーをフィーチャーとして抽出し、その輝度温度の分布特性を分析・考察した。その結果、以下のことを確認することができた。

(1) 熱画像の輝度温度とそれが形成された環境条件をピクセルベースの統計的対応ではなく、RPCSでサーモフィーチャーとして抽象化する手法を開発した。

(2) RPCSは都市熱環境の空間構造を大局的に捉えながらも、ローカルの $UHII_{BT}$ あるいは $UCII_{BT}$ を評価する有効な手法であることを確認

した。

(3) ヒートアイランドでは $UHII_{BT}$ がフィーチャーの面積と対数関係、クールアイランドでは $UCII_{BT}$ フィーチャーの面積と顕著な線形関係が存在することが認められた。これはつまり、都市集積の進行はヒートアイランドの空間規模の拡大と $UHII$ の増大をもたらすことを意味し、一方、規模の大きな自然的土地利用はより強いクールアイランド効果をもたらすことを意味している。

(4) 都市内部にみられる輝度温度の地域間のばらつきはキャノピー層の土地利用と地形条件の影響が強いことが観察された。つまり、上流域、台地上、斜面上の自然的土地利用によって形成された冷気流が日没後に斜面に沿って流れ下り、クールアイランドの拡大につながったことが認められた。

中高解像度の熱画像に関する以上の知見は都市計画や地域計画のなかで地形条件を配慮した土地利用、あるいは自然的土地利用の保全を考えるにあたって、有益な情報となるだろう。

しかし、本稿は晩秋の熱画像を用いたため、樹林地はヒートフィーチャーとして現れ、樹林地の冷却効果(夏季)は検証できていない。また、クールアイランドの形成における移流の影響については、本稿では定性的考察にとどまっている。今後、地上観測も踏まえて、そのメカニズムを詳細に検証する必要がある。さらに、サーモフィーチャーのヒートアイランド/クールアイランド強度の影響要因について、本稿では面積についてしか考察していない。キャノピー層の構造などほかにも影響する要因があると考えられる。これらのことは今後の課題として、引き続き検証していきたい。

謝 辞

本研究は平成15年度科学研究費補助金(基盤研究(C)、研究代表者 網林、課題番号15500690)の一環で行われたものである。また、同研究は平成17年度から新規課題として採択されている(基盤研究(C)、研究代表者 網林、課題番号17500704)。本研究を進めるにあたって、首都大学東京大学院理学研究科三上岳彦教授から貴重なご意見をいただいた。都市計画基礎調

査データは横浜市都市計画局からご提供いただいた。データ処理に関して、修士学生であった嶋原史也君から協力をいただいた。ここに記して感謝を表す次第である。

注

- 1) Landsat/ETM は 2003 年 11 月からセンサに異常があり、正常に画像データを取得できない状況にある。2000 年 5 月から 2003 年 11 までに撮影されたデータのみ利用できる。
- 2) 閾値条件を設定してパッチを抽出することは画像の深度を減らすことと同じである。画像データは深度が深いほど、詳細な境界を取り出すことができるが、クラス数が多くなり、大局的な構造を捉えにくいことになる。分類に関しては教師付き分類などもあるが、本稿では都市温度場に対する相対的高温域、低温域を議論したいため、閾値設定による簡単な方法を採用した。
- 3) 厳密には輝度温度の最大値・最小値の出現場所とその土地利用を検証すべきであるが、都市スケールの解析を考えると、そのような煩雑な処理を避けたい。もし特定のサーモフィーチャーを取り上げるなら、そのパッチ部と周辺地域部を分けて最大値・最小値の出現場所と土地利用などを合わせて詳しく検証することもできる。

文 献

- Arnfield, A.J. (2003) Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchange of energy and water, and the urban island. *Int. J. Climatol.*, **23**, 1-26.
- Carlson, T.N. (1986) Regional-scale estimates of surface moisture availability and thermal inertia using remote thermal measurements. *Remote Sens. Rev.*, **1**, 197-247.
- 福田垂矢子・佐保満足 (2004) 横浜市内の気温分布調査—2002 年～2003 年の結果—。横浜市環境科学研究所報, **28**, 58-62.
- 厳 網林 (2003) GIS の原理と応用。日科技連。
- 厳 網林・三上岳彦 (2002) ランドサット TM 熱画像による輝度温度と地上気温との関係の分析。地学雑誌, **111**, 695-710.
- 厳 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。地学雑誌, **113**, 482-494.
- Gillespie, A.R., Rokugawa, S., Hook, S.J., Matsunaga, T. and Kahle, A.B. (1999) Temperature/Emissivity Separation Algorithm Theoretical Basis Document, Version 2.4.
<http://www.science.aster.ersdac.or.jp/en/documnts/pdf/2b0304.pdf> [Cited 2006-01-26]
- Gossmann, H. (1986) The influence of geography on local environment as inferred from night thermal infrared imagery. *Remote Sens. Rev.*, **1**, 249-275.
- Hall, F.G., Huemmrich, K.F., Goetz, S.J., Sellers, P.J. and Nickeson, J.E. (1992) Satellite remote sensing of surface energy balance: success, failures, and unresolved issues in FIFE. *J. Geophys. Res.*, **97**, 19061-19089.
- 堀口郁夫・小林哲夫・塚本 修・大槻恭一 (2004) 局地気象学。森北出版。
- 入江彰昭・平野侃三 (1995) ランドサット TM データ解析による年気象緩和に効果的な緑地形態と規模に関する研究—千葉市域を事例として—。第 30 回日本都市計画学会学術論文集, **30**, 325-331.
- 入江彰昭・平野侃三 (1999) ランドサット TM データ解析による年気象緩和に効果的な緑地形態と規模に関する研究—熊本市域を事例として—。第 34 回日本都市計画学会学術論文集, **34**, 7-12.
- 岩井一博・高木直樹・山下恭弘 (2002) 土地利用と標高を考慮した気候マップの作成と気象の実態に関する研究—長野市全体を対象として—。日本建築学会計画系論文集, **558**, 63-70.
- Jet Propulsion Laboratory (JPL) (2001) ASTER Higher-Level Product User Guide Version 2.0, JPL D-20062.
http://ivis.eps.pitt.edu/courses/ars/pdf/ASTERHigherLevelUserGuide_v2.pdf [Cited 2006/01-26].
- 近藤昭彦・開発一郎 (1995) 広島市市街地におけるランドサットデータによる輝度温度と気温および都市キャノピー層の構造との対応関係。地学雑誌, **104**, 225-238.
- 近藤昭彦・栗原昭子・三上岳彦 (1993) ランドサットデータによる関東平野の諸都市のヒートアイランド強度の解析。日本リモートセンシング学会誌, **13**(2), 32-42.
- 近藤昭彦・宝 馨・立川康人 (1997) 航空機 MSS リモートセンシングによるヒートアイランド現象の解析—気温と地表面温度の同時観測による検討—。地学雑誌, **106**, 377-385.
- 近藤純正 (2000) 地表面に近い大気科学。東京大学出版会。
- 三上岳彦 (1999) 首都圏グランドモニタリングによるヒートアイランドの実態解明。久保幸夫編：ヒートアイランドの計測制御システム中間報告書。科学技術振興事業授業団 (JST), 1-3.
- Mikami, T., Kanari, Y., Yamazoe, Y., Suzuki, C., Kimura, K. and Kubo, S. (1999) Investigation of urban heat islands in Tokyo Metropolis based on the ground monitoring system. *Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millennium: Selected Papers from the Conference ICB-ICUC'99, Sydney, 8-12 November 1999*, 491-495.
- 成田健一・三上岳彦・菅原広史・本條 毅・木村圭司・桑田直也 (2004) 新宿御苑におけるクールアイランドと冷気の滲み出し現象。地理学評論, **77**, 403-420.
- 嶋海大典・水野 稔・中村安弘・下田吉之・比嘉 博 (2001) 冷気流の発生構造把握のための実測調査研究—丘陵地周辺の住宅地域に及ぼす冷気流の影響—その 1。日本建築学会計画系論文集, **543**, 85-91.
- 嶋海大典・水野 稔・下田吉之 (2002) 地域気候特性

- に配慮した地域・建築計画指針に関する基礎的検討—都市周辺の丘陵地を対象とする気候解析を通して—．日本建築学会計画系論文集，**561**，93-100．
- 日本建築学会（2000）都市環境のクリマアトラス—気候情報を活かした都市づくり．ぎょうせい．
- Oke, T.R. (1973) City size and the urban heat island. *Atmos. Environ.*, **7**, 769-779.
- Oke, T.R. (1984) Methods in Urban Climatology, Applied Climatology. *Zurcher Geographische Schriften*, **14**, 19-29.
- Price, J.C. (1979) Assessment of the urban heat island effect through the use of satellite data. *Mon. Weather Rev.*, **107**, 1554-1557.
- Price, J.C. (1986) Remote sensing in the thermal infrared. *Remote Sens. Rev.*, **1**, 187-196.
- Peterson, C.T. (2003) Assessment of urban versus rural in situ temperatures in the contiguous United States: no difference found. *J. Clim.*, **16**, 2941-2959.
- Quattrochi, A.D. and Goel, N.S. (1995) Spatial and temporal scaling of thermal infrared remote sensing data. *Remote Sens. Rev.*, **12**, 255-286.
- Quattrochi, A.D. and Luvall, J.C. (1999) Thermal infrared remote sensing for analysis of landscape ecological process: methods and applications. *Landsc. Ecol.*, **14**, 577-598.
- Riitters, K.H., O'Neill, R.V., Hunsaker, C.T., Wickham, J.D., Yankee, D.H., Timmins, S.P., Jones, K.B. and Jackson, B.L. (1995) A factor analysis of landscape pattern and structure metrics. *Landsc. Ecol.*, **10**, 23-39.
- Roth, M., Oke, R. and Emery, W.J. (1989) Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *Int. J. Remote Sens.*, **10**, 1699-1720.
- 佐俣満夫 (1994) 都市での植生指標を用いたヒートアイランド現象解析のための NVI モデル．横浜市環境科学研究所報，**18**，21-26．
- 佐俣満夫 (1995) 都市での植生指標を用いたヒートアイランド現象解析のための NVI モデル（その2）—季節による特性．横浜市環境科学研究所報，**19**，27-30．
- 佐俣満夫 (1996) 横浜地域における地表温度と気温の分布特性（その1）—夏期と春季．横浜市環境科学研究所報，**20**，9-12．
- 佐俣満夫 (1997) 横浜地域における地表温度予測モデル．横浜市環境科学研究所報，**21**，13-16．
- 佐俣満夫 (1999) 横浜地域における地表温度予測モデル（その2）—1995年～1997年の解析結果．横浜市環境科学研究所報，**23**，4-8．
- 佐俣満夫 (2000) 横浜地域におけるヒートアイランド調査—1998年の結果—．横浜市環境科学研究所報，**24**，57-60．
- 佐俣満夫 (2002) 横浜市の気温によるヒートアイランド調査（その2）—2000（1999）年の結果．横浜市環境科学研究所報，**26**，113-116．
- Short, M.N. and Stuart, M.L., Jr. (1982) *The heat capacity mapping mission (HCMM) anthology*. Scientific and Technical Information Branch, NASA, Washington, DC.
- Spronken-Smith, R.A. and Oke, T.R. (1998) The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *Int. J. Remote Sens.*, **19**, 2085-2104．
- 菅原宏史 (2001) 都市構造物と大気境界層の熱交換．防衛大学校博士論文．
- 菅原広史・成田健一 (2003) クールアイランドの形成．日本風工学会誌，**97**，23-27．
- Svensson, K.M. and Eliasson, I. (2002) Diurnal air temperatures in built-up areas in relation to urban planning. *Landsc. Urban Plan.*, **61**, 37-54.
- 田宮兵衛 (1995) 都市ヒートアイランド研究における地表温度観測の意義と実際．気候影響・利用研究会会報，**11**，82-87．
- 竹林英樹・森山正和 (2002) 夏季夜間における山麓冷気流の集積・流出過程に関する研究．日本建築学会計画系論文集，**558**，57-61．
- 竹林英樹・森山正和・糸川文崇 (2001) 夏季夜間における山麓冷気流の出現頻度と市街地における影響距離．日本建築学会計画系論文集，**542**，99-104．
- 東京都 (2004) 東京都議会都市・環境委員会速記録第十八号．
<http://www.gikai.metro.tokyo.jp/gijiroku/token/d3040089.htm> [Cited 2006/01/26]
- Voogt, A.J. and Oke, T.R. (2003) Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sens. Environ.*, **86**, 370-384.

（2006年2月6日受付，2006年5月22日受理）