

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

巖 網 林* 三 上 岳彦**

Estimation of Urban Heat Island Intensity with LANDSAT/TM Thermal Images

Wanglin YAN * and Takehiko MIKAMI **

Abstract

Urban Heat Island, a meteorological phenomenon by which the air temperature in an urban area increases beyond that in the suburbs, grows with the progress of urbanization. The difference of air temperatures between city center and suburbs is called Urban Heat Island Intensity (UHII). UHII is usually calculated as a fluctuation of the highest and lowest values of ground-observed air temperatures. However, the magnitude of UHII may vary with the locations of observations. Satellite remote sensing has been expected to be effective for obtaining thermal information of the earth's surface with a high resolution. However, the possibility and the technique for evaluating UHII with brightness temperature (BTUHII) from satellite images have not been verified yet. This paper, taking Tokyo as the study area, aims to clarify a method for calculating BTUHII with Landsat/TM thermal images and verifying its usability with *in situ* ATUHII. Based on the principle of ATUHII, we considered that BTUHII must be estimated with the same spatial resolution as the spatial scale at which air temperatures are formed. This is called the resolution condition. Moreover, the highest and lowest temperatures for BTUHII must come from similar land uses as those for ATUHII. This is called the land use condition. Our previous research has shown that the brightness temperatures reach a maximal correlation with air temperatures at a distance of about 600 m in Tokyo. Invoking this result, we improved the spatial resolution of brightness temperature by applying a low path filter to the Landsat/TM night thermal image dated March 1, 1999. To match the land use condition, we regrouped the 10 m high-resolution land use data into 8 land use categories according to the brightness temperature and NDVI. In addition, we divided the study area from the city center to the suburbs into 6 zones: CBD, SubCBD, within 10 km, 10-20 km, 20-30 km, and beyond 30 km to take account of the impact of land uses in different distance spheres. The following facts have been successfully confirmed: (1) In an urban context like Tokyo, resampling brightness temperature image into a resolution of 500 m can effectively remove the influence of cooling or heating facilities, and make the spatial structure of UHII much clearer. (2) BTUHII is a little smaller than ATUHII, but they are still comparable.

* 慶應義塾大学環境情報学部, 対策メディア研究科

** 東京都立大学理学研究科地理学教室

* Faculty of Environmental Information, Graduate School of Media and Governance, Keio University

** Department of Geography, Tokyo Metropolitan University

(3) Although BTUHII can not substitute for ATUHII completely, the trend of BTUHII decreasing from the city center to the suburbs is coincident with ATUHII so BTUHII would be an effective indicator for a comparison of thermal attributes between different urban districts or land use categories. We believe that these conclusions have great significance for using satellite sensed thermal images in research on urban climatology and the practice of urban planning.

Key words : urban heat island intensity, TM thermal image, Tokyo Metropolitan Area, spatial resolution, land use condition

キーワード : 都市ヒートアイランド強度, TM 熱画像, 東京, 画像解像度, 土地利用条件

1. はじめに

都市の拡大にともない, 市街地の気温が郊外より高くなり, 都市ヒートアイランド(UHI: Urban Heat Island)現象が発達する。都市中心部と郊外部との気温差は都市ヒートアイランド強度(UHII: Urban Heat Island Intensity)といい, その値は中心市街と郊外に設置した最低で2カ所の気温観測局によって測定することができる。しかし, 都市の中心や郊外に関しては, 必ずしも明確な定義があるわけでないため, UHIIの値はその計算に利用する最高気温と最低気温の参照地点に依存することになる。このような少数の観測による偏りを避けるために, 都市全域にわたって観測局を密に設置し, 気温分布を詳細に測定することが試みられている(Mikami *et al.*, 1999)。しかし, 高密度の気温観測網を設置・運営することは膨大な費用がかかるため, どここの都市においても容易に実施できることではない。

地表面の高密度の温度情報を取得するもう1つの方法として, 衛星リモートセンシングが期待されてきた。熱赤外バンドを持つ地球観測衛星は地表面の熱放射を観測し, Terra/ASTERでは90 m, Landsat7では60 mの解像度で熱画像を取得している。衛星熱画像のデジタル値から求めた温度情報は輝度温度といい, 地表面の熱放射を高解像度で面的に捉えていることが特徴である。特に静穏な夜間に撮影した衛星熱画像は地上で観測した気温と高い相関が見られ, 気温の代わりに輝度温度

を用いてUHIの空間構造を捉えることができる(巖・三上, 2002)。気温による都市ヒートアイランド(気温UHI)や気温による都市ヒートアイランド強度(気温UHII)と区別するために, 輝度温度が示すヒートアイランドを輝度温度ヒートアイランド(輝度温度UHI)といい, 輝度温度の最大値と最小値の差を輝度温度ヒートアイランド強度(輝度温度UHII)という。

気温と輝度温度が統計的に相関するからといって, 気温UHIIと輝度温度UHIIにも同等な関係があるとは限らない。つまり, 輝度温度の最大値と最小値の差をそのまま輝度温度UHIIの評価に利用ことはできない。それは大型製鉄所やゴミ焼却所のような熱排出源が輝度温度最大値に, 大型冷凍庫のような熱吸収源が輝度温度最小値に大きな影響を与えるからである(Price, 1979)。本来, UHIIといえば昼間には最小値, 夜間には最大値を示すのが普通であるが, これらの熱排出源や熱吸収源の影響によって, 輝度温度UHIIは昼に最大, 夜に最小となることがある(Roth *et al.*, 1989)。また, 同じ地区においてもわずかな場所の違いで輝度温度がかなり変化することもあり, 輝度温度UHIIの評価に困難をもたらすことになる(近藤ほか, 1997)。結局, 地域を均一の精度で一面に観測した輝度温度データからどのように輝度温度UHIIを評価するかについて, 既存研究においてはまだ十分に検証されていない。

本研究の目的は, ランドサット/TM熱画像を用いて輝度温度UHIIを客観的に評価するためには

輝度温度の最大値と最小値をどの場所からどのように取るべきかを明らかにし、それによって計算される輝度温度 UHII は気温 UHII とどれぐらい一致するかを検証したものである。

II. 研究の視点

1) 問題の所在

都市気候学では一般に都市の表面とその上空を、それぞれ都市キャノピー層と都市境界層として捉えて UHI を議論する。キャノピー層とは地面や植物や建物の表面によって構成される凸凹のある空間であり、その中の温度はキャノピー気温という。都市境界層とはキャノピー層のさまざまな建造物からの放射や人工排熱によってキャノピー層の上に形成された大気層のことであり、その中の温度は境界層気温という。本論でいう気温は地上 1 ~ 3 m の高さに設置した気温計によって測定されたキャノピー気温である。衛星熱画像は都市境界層の大気条件からも影響を受けるが、主としてキャノピー層の放射特性を表している。また、ランドサット/TM バンド 6 の熱画像は解像度 120 m であることから、凹凸のあるキャノピー層を平面的土地利用データや土地被覆データで捉えても差し支えないと思われる。

キャノピー気温は地表面と大気との間のエネルギー交換によって形成される物理量である。すなわち、気温観測値は観測局のまわりの数 100 m 範囲のキャノピー層の温度特性を代表している (Carlson, 1986)。一方、衛星熱画像のデジタル値はそれぞれの画素サイズ内の地表面の平均的放射特性を代表している。1 画素の広さ (画像解像度) が数 10 m から数 100 m ないし数キロメートル四方に及ぶ。解像度が高いほど、熱画像のデジタル値が地表面の局地的土地利用や土地被覆の放射特性に応じて敏感に変化する。このことから、田宮 (1995) は、移流によって水平的に均質化されている気温と比べて、(高解像度) 衛星による輝度温度の空間代表性が低いことを指摘した。

気温が形成される空間スケールと輝度温度の画像解像度が一致するときに、気温データと輝度温度データとの間に相関が高く (Roth *et al.*, 1989),

その距離値は 600 m 程度であることが判明されている (厳・三上, 2002)。これは輝度温度 UHII と気温 UHII との間にも同等な相関があることを意味しないが、輝度温度 UHII を計算するときの 1 つの条件を示唆するものと思われる。つまり、輝度温度 UHII を気温 UHII と比較可能にするには、元データとしての輝度温度データが気温データの空間スケールと同程度の画像解像度を持たなければならない。本論では、これを画像解像度条件という。

輝度温度 UHII の値に影響するもう一つの要因は大型の排熱施設や冷却施設の存在である。その影響を考える前に、気温 UHII の評価方法をもう一度確認したい。

我々はキャノピー温度の分布や気温 UHII を捉えるために、都市のさまざまな用途の土地に観測局を設置し、中心市街を代表する土地利用からの観測値を最大値とし、郊外を代表する土地利用からの観測値を最小値として、気温 UHII を計算する。都市ヒートアイランドの原理から、中心市街の代表的な土地利用は一般に商業業務用地や住宅用地といった密度が高く、エネルギー消費の多い土地、郊外の代表的な土地利用は農地や森林といった自然的土地が多い。

輝度温度は、衛星センサが対象地域の地表面放射を一面に走査した結果である。このように取得された輝度温度の最大値は必ずしも我々が意図する中心市街を代表する土地にあるとは限らない。例えば、海浜に位置する製鉄所や郊外にあるゴミ焼却所からは大量の人工排熱を出すことがある。それによって衛星熱画像には極端に大きい値が現れることがある。同様に、中心市街においても大型冷凍庫があると、衛星熱画像には格段に小さい値を示すことになる。これらの排熱施設や冷却施設は都市の土地利用の一部であろうが、都市ヒートアイランドの発達を代表する土地利用とは言い難い。また、これらの輝度温度データの最大値と最小値はそれぞれ中心市街と郊外から現れるとは限らないため、その温度差は事実上、UHII とは関係ないものである。

したがって、輝度温度 UHII を気温 UHII と比

較可能にするためには、輝度温度の最大値（最小値）が中心市街（郊外）に位置し、それが対応する土地利用や土地被覆も UHII が要求する中心市街（郊外）の代表的なものでなければならない。本論では、これを土地利用条件という。

以下では、画像解像度条件と土地利用条件に基づいて、輝度温度 UHII を計算し、気温 UHII で検証することにする。

2) 研究の方法

キャノピー気温が観測所周辺 600 m の距離で輝度温度と最大の相関があることは前の研究で判明されている（巖・三上, 2002）。それを利用して、ランドサット/TM の輝度温度データを数値フィルターで平滑化し、1 画素が代表する空間範囲をキャノピー気温と同程度のものにした。

そして、図 1 の地域を対象として研究を進めた。輝度温度や気温の最大値・最小値がそれぞれ都市の中でどこから現れているかを特定するために、対象地域を大手町一帯から西へ“10 km 以内 (Z3)”, “10–20 km (Z4)”, “20–30 km (Z5)”, “30 km 以遠 (Z6)” という 4 つの地区に区分した。都心から西へ同心円を取ったのは、東京の土地利用が西方面に向かって商業業務地、都心住宅地、郊外住宅、農地、森林というふうに比較的明瞭な環状を呈し、都心からの距離に応じて土地利用と温度が変化することを容易に捉えると思ったからである。ただし、10 km 以内でも土地利用の形態にまだ差が大きいことから、大手町・霞ヶ関一帯を“都心 (CBD) (Z1)”, 新宿、池袋、渋谷、上野等を“副都心 (SubCBD) (Z2)”として取り出すことにした。“都心”, “副都心”の領域は東京都が平成 10 年に発行した「東京の土地利用 平成 8 年東京都区部—平成 8 年度土地利用現況調査結果の概要」に示されたエリアマップをもとに作成した。

さらに、気温と輝度温度の最大値・最小値が現れた場所の土地利用を特定するために、国土地理院が発行する細密数値情報という 10 m メッシュ土地利用データを利用した。

以上のデータをもとに、地区区分別と土地利用区分別に輝度温度分布を集計し、その中から最大値・最小値を抽出して輝度温度 UHII を計算した。

気温データについても同様な処理を適用し、気温 UHII を求めた。最後に輝度温度 UHII は気温 UHII とどれだけ一致するかを検証した。

III. データの解析

1) データの準備

(1) 輝度温度データ

1999 年 3 月 1 日午後 9 時に撮影されたランドサット/TM 熱画像データ（バンド 6 画像）について、NASDA（1986）の式によって画像のデジタル値を輝度温度データに変換し、さらに放射率補正を行ったものを利用した（図 2 参照）。TM 熱画像はもともと画像解像度 120 m であるが、1998 年 12 月 13 日に撮影された 30 m 解像度の可視近赤外画像から作成した土地被覆データをもとに放射率補正を行ったため、補正後の輝度温度データは解像度 30 m となった（巖・三上, 2002）。

(2) 土地利用データ

国土地理院が発行する 1994 年首都圏細密数値情報を利用した。細密数値情報は、国土地理院が首都圏、近畿圏、中部圏を対象として行われる宅地動向調査の結果を 10 m メッシュで数値化したものである。首都圏においては 1974 年から 5 年おきに整備されているが、現在利用できるのは 1994 年までの 5 期分である。理想上、輝度温度データと同時期のものを使うべきだが、そのようなデータは現在入手できない。ランドサット画像による土地被覆データで代替する方法もあるが、本論では商業業務地と住宅地、農地と森林などを区別する必要があるため、30 m 解像度の衛星データではそのような土地利用を判別することができない。東京では 90 年代後半に土地利用が大きく変化していないことを仮定し、5 年前の土地利用データを使っても、本論の考察に大きな影響を与えないと判断した。

(3) 気温データ

科学技術振興事業団では 1996 年度から 2000 年度まで 5 年間にわたって、UHI の計測と制御に関する研究プロジェクトを実施した（Mikami et al., 1999）。同プロジェクトでは東京都 23 区を含む 40 km × 40 km の地域に平均 4 km ほどの間隔

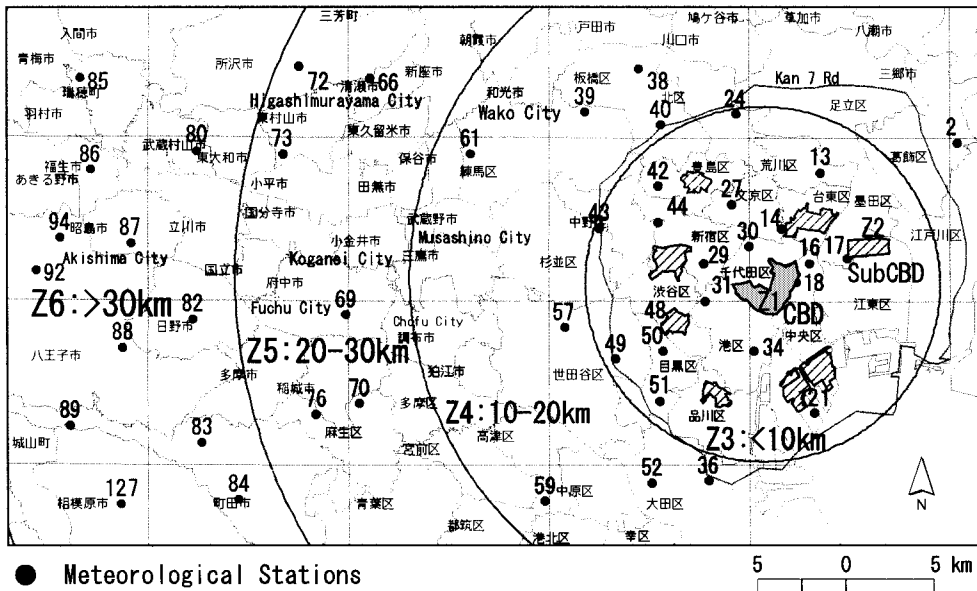


図 1 対象地域，地区区分と気温観測局の分布．

Fig. 1 Study area, zoning and meteorological stations.

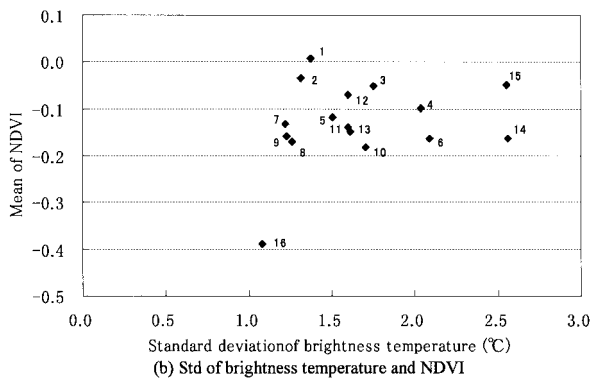
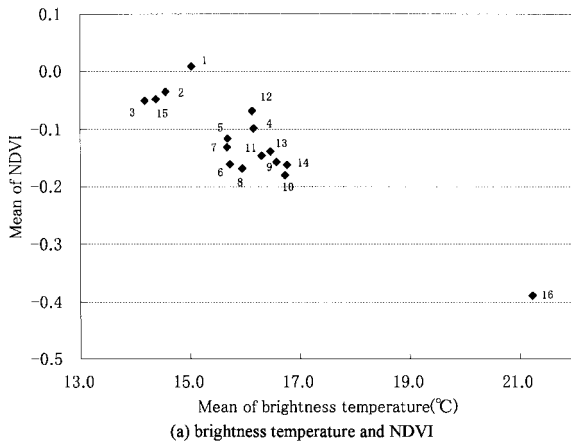


図 3 NDVI・輝度温度・輝度温度標準偏差による土地利用区分．

1. 森林, 2. 田, 3. 畑, 4. 造成中地, 5. 空き地, 6. 工業用地, 7. 一般低層住宅地, 8. 密集低層住宅地, 9. 中高層住宅地, 10. 商業業務地, 11. 道路用地, 12. 公園緑地, 13. 公共施設, 14. 河川・湖沼, 15. その他の用地, 16. 海域

Fig. 3 Relationships of brightness temperature and NDVI.

1. forest, 2. paddy land, 3. farm land, 4. in construction, 5. bare land, 6. industrial land, 7. low story residential, 8. low and dense residential land, 9. mid/high-rise residential, 10. commercial land, 11. road, 12. park and poen space, 13. public facility, 14. river and lake, 15. other facility, 16. sea

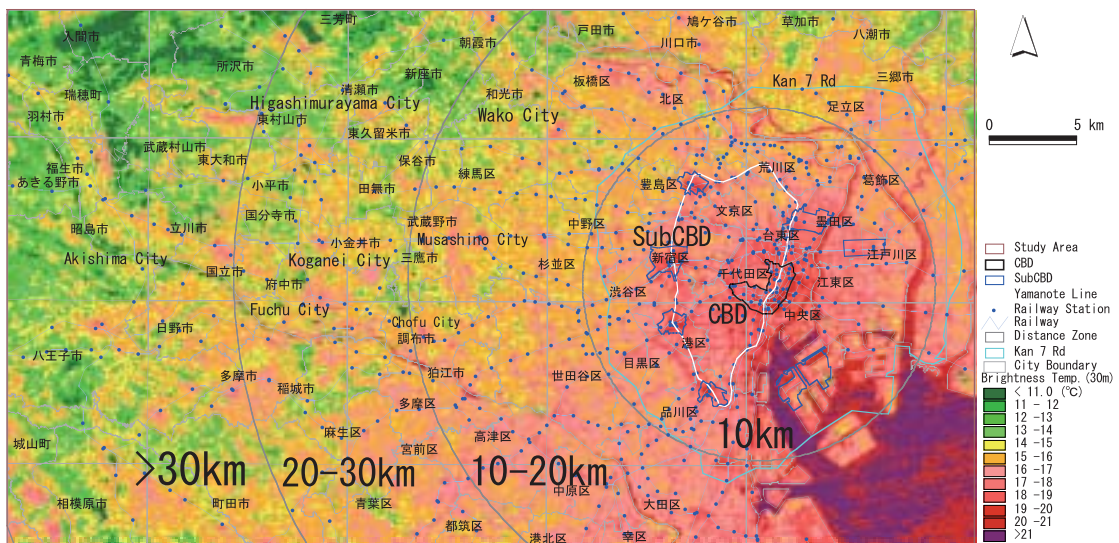


図 2 放射率補正後、画像解像度 30 m の輝度温度画像 (1999 年 3 月 1 日午後 9 時)。

Fig. 2 Landsat/TM brightness temperature image with a resolution of 30 m.

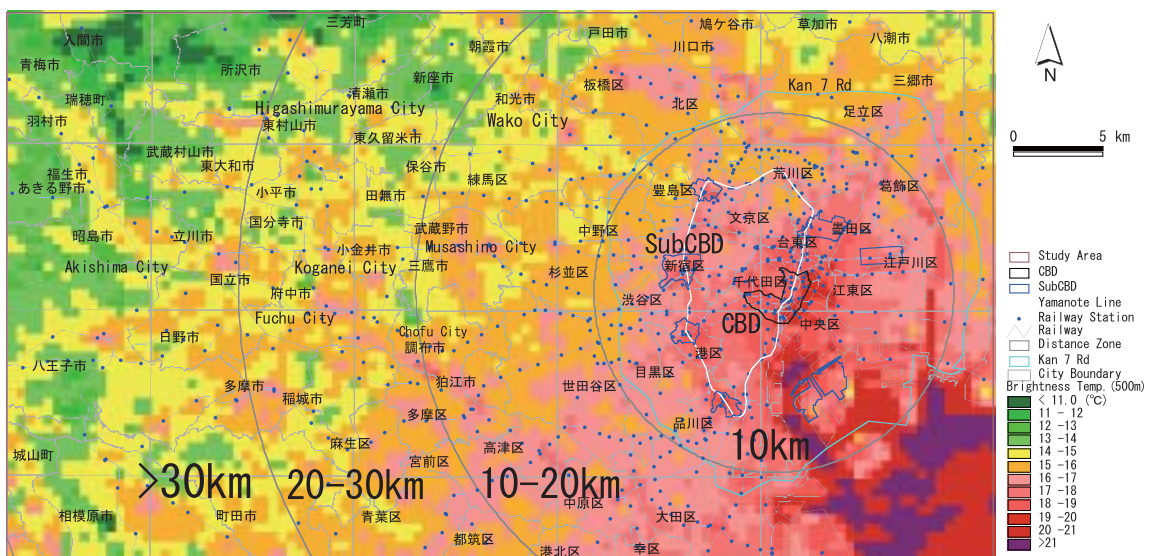


図 4 画像解像度 500 m に平滑化した輝度温度データ。

Fig. 4 Landsat/TM brightness temperatures with a resolution of 500 m.

で合計 119 カ所の観測局を設置し、3 年間にわたって地上の温湿度を 15 分間隔で連続的に観測し、高密度の観測データを取得した。観測機器には A タイプ(101 点)と B タイプ(18 点)の 2 種類があったが、本研究では A タイプの観測結果を用いた(三上, 1999; 山添ほか, 1999)。研究地域における観測局の分布は前出の図 1 に示したとおりである。

2) 土地利用区分の再統合

細密数値情報では、土地利用が森林(1:土地利用分類コード, 以下同)、田(2)、畑(3)、造成中地(4)、空き地(5)、工業用地(6)、一般低層住宅地(7)、密集低層住宅地(8)、中高層住宅地(9)、商業業務用地(10)、道路用地(11)、公園緑地(12)、公共施設(13)、河川・湖沼(14)、その他の用地(15)、海(16)という 16 種類の区分になっている。本論では、これほど詳細な分類が必要ないため、以下に述べる方法で類似する熱特性の土地利用を再統合した。

土地利用の熱特性は厳密にいうと、土地・建物の熱容量や人工排熱等の情報を用いて評価すべきであるが、ここでは便宜上、衛星画像から簡単に計算できる正規化植生指数 NDVI (Normalized Differential Vegetation Index) と輝度温度データを使うことにした。具体的にはそれぞれの土地利用の NDVI 平均値、輝度温度平均値、輝度温度標準偏差を算出した。NDVI は輝度温度の撮影日に近い 1998 年 12 月 13 日のランドサット TM 画像から式(1)を用いて計算した。

$$NDVI = \frac{BAND4 - BAND3}{BAND4 + BAND3} \quad (-1 \leq NDVI \leq 1) \quad (1)$$

ここで、BAND4 は TM 画像バンド 4 のデジタル値(0 ~ 255)、BAND3 は同バンド 3 のデジタル値(0 ~ 255)である。

緑色植物は都市ヒートアイランドを緩和する効果があり、現存植生量を表す NDVI と輝度温度との間に負の相関があることで知られている(Smith and Choudhury, 1990; Kawashima, 1994)。しかし、NDVI 値には建造物の熱容量の違いや人工排熱の影響が反映されないため、それ

だけではすべての土地利用の熱特性を十分に差別化することができない。そこで、対象地域全体について、放射率補正後の解像度 30 m の輝度温度データを細密数値情報の土地利用分類別に集計し、それぞれの平均値と標準偏差を NDVI 値と併せて、土地利用分類の統合に使った¹⁾。

図 3(a) は各土地利用の輝度温度平均値と NDVI 平均値との関係、図 3(b) は各土地利用の輝度温度標準偏差と NDVI 平均値との関係を示している。図中各点に付く番号は細密数値情報での土地利用分類コードである。図 3(a) に示しているように、海域(16)の温度分布は他の土地利用区分と大きく異なっている。図 3(a) の左上に森林(1)、田(2)、畑(3)などの NDVI の高い自然的土地利用が集まっている。工業用地(6)は低層住宅用地(7)と比べると、NDVI と輝度温度に差がないが、図 3(b) に示すように、工業用地(6)の輝度温度標準偏差が大きい。以上のように考察した結果、造成中土地(4)と工業用地(6)、河川・湖沼(14)とその他の用地(15)をそれぞれまとめた。最終的に、研究地域の土地利用を表 1 に示すように、森林(A、統合後の土地利用区分コード, 以下同)・農地(B)・公園緑地(C)・低層住宅地(D)・中高層用地(E)・工業用地(F)・河川(G)・海域(H)という 8 種類に統合した。中でも森林(A)と農地(B)は郊外を代表する土地利用、低層住宅地(D)と中高層用地(E)と工業用地(F)は市街地を代表する土地利用である。

3) 数値フィルターによる輝度温度データの処理

ランドサット TM の輝度温度データが代表する空間範囲を広げるために、図 2 に示した解像度 30 m の輝度温度画像を 15 × 15 の数値フィルターで平滑化し、それから最近隣法で 500 m の画像解像度にリサンプリングした。画像解像度を 500 m にしたのは、既存研究(巖・三上, 2002)では、400 ~ 600 m までの気温・輝度温度の相関に大差がなかったこと、都市における他の地理的データは 500 m メッシュサイズを採用することが多いからである。これによって作成した 500 m 解像度の輝度温度分布を図 4 に示した。

表 1 土地利用区分の作成 .

Table 1 regrouping land use classes by NDVI and brightness temperature (BT).

Land use class		Mean of BT ()	Std of BT ()	Mean of NDVI	New land use class
code	name				
1	Forest	15.0	1.4	0.0	A : Forest
2	Paddy Land	14.6	1.3	0.0	B : Farmland
3	Farm Land	14.2	1.8	- 0.1	
12	Park and Open Space	16.1	1.6	- 0.1	C : Park
5	Bare Land	15.7	1.5	- 0.1	D : Low-story
7	Low-story Residential	15.7	1.2	- 0.1	
8	Low and Dense Residential Land	16.0	1.3	- 0.2	
9	Mid/high-rise Residential	16.6	1.2	- 0.2	E : Multi-story
10	Commercial Land	16.7	1.7	- 0.2	
11	Road	16.3	1.6	- 0.1	
13	Public Facility	16.5	1.6	- 0.1	F : Industrial
4	In construction	16.2	2.0	- 0.1	
6	Industrial Land	15.7	2.1	- 0.2	
14	River and Lake	16.8	2.6	- 0.2	G : River
15	Other Facility	14.4	2.6	0.0	
16	Sea	21.2	1.1	- 0.4	H : Sea

細密数値情報での土地利用区分：

1．森林，2．田，3．畑，4．造成中地，5．空き地，6．工業用地，7．一般低層住宅地，8．密集低層住宅地，9．中高層住宅地，10．商業業務地，11．道路用地，12．公園緑地，13．公共施設，14．河川・湖沼，15．その他の用地，16．海域

統合した後の土地利用区分：

A：森林，B：農地，C：公園緑地，D：低層住宅地，E：中高層用地，F：工業用地，G：河川，H：海域

4) 地区別・土地利用別輝度温度の集計

最後に，500 m 画像解像度の輝度温度データを地区別 (Z1 ~ Z6)，土地利用別 (A ~ H) に平均値を求めた。結果は表 2 に示している。表 2 の中の Total 欄は当該地区または土地利用全体の平均値である。また，表 2 の中の UHII と UHII 欄に関しては， 章 5) の項で詳しく考察する。

IV . 考 察

1) 画像解像度の変更が UHI の空間構造の観察に及ぼす影響

図 4 が示すように 500 m 解像度の輝度温度画像

は東京の輝度温度の空間分布を鮮明に捉えている。都心・副都心には高温域が形成されている。山手線沿線から 10 km 以内，10 ~ 20 km，20 ~ 30 km というふうに 10 km 距離圏ごとに輝度温度が約 1 ずつ低下していく。武蔵野市・小金井市・東村山市・国立市等では，鉄道駅前や市町中心に局地的なヒートアイランドが形成されている。これらのことは図 2 に示した 30 m 解像度のデータからも読み取れたが，解像度を 500 m に落としても，局所的な UHII が平準化されることなく，都市全体の輝度温度が都心から郊外へ漸次的に推移する様子をより鮮明に映す効果が見られた。

表 2 地区別土地利用別輝度温度平均値 .

Table 2 Mean brightness temperatures () aggregated by zone and land use class.

Zone	Land use class								Total	UHII	UHII
	A	B	C	D	E	F	G	H			
Z1 : CBD			19.1	19.6	19.6				19.5	5.9	4.9
Z2 : SubCBD			17.8	17.5	18.4	17.9		19.3	18.3	4.7	3.7
Z3 : <10 km	17.5		17.7	17.0	17.8	17.7	18.2	20.5	17.9	4.1	3.1
Z4 : 10-20 km	16.1	15.6	16.2	16.1	16.4	16.8	16.3	21.2	17.0	3.1	2.1
Z5 : 20-30 km	15.2	14.7	15.6	15.4	15.6	15.4	15.2		15.4	1.9	0.0
Z6 : >30 km	14.6	13.7	14.8	14.6	15.0	14.4	14.4		14.6	0.0	
Total	15.0	14.5	16.2	15.8	16.4	16.0	16.0	20.9	16.1		

A : 森林, B : 農地, C : 公園緑地, D : 低層住宅地, E : 中高層用地, F : 工業用地, G : 河川, H : 海域

A : forest, B : farmland, C : park, D : low-story, E : multi-story, F : industrial, G : river, H : sea

表 3 対象地域全体を対象とした輝度温度データ・気温データの統計 .

Table 3 Air temperatures (AT) and brightness temperatures (BT) with/without filtering ().

Statistics	AT	BT in 30 m image	BT in 500 m image
Min	3.0	- 5.8	9.0
Max	10.8	24.4	22.4
Range=Max - Min	7.8	30.2	13.5
Mean	7.8	16.1	16.1
STD	2.0	2.2	2.0
Samples	46 points	all of cells	all of cells

2) 画像解像度の変更が都市全体の輝度温度差の計算に及ぼす影響

数値フィルターが輝度温度の最大値・最小値に与える影響を検証するために、フィルターをかける前の 30 m 解像度の輝度温度、フィルターをかけた後の 500 m 解像度の輝度温度、そして、対象地域において観測された気温データの統計量を表 3 にまとめた。

地域全体では、30 m 解像度の輝度温度データでは最小値 (Min) - 5.8 , 最大値 (Max) 24.4 , 較差 (Range) 30.2 となっている。それを数値フィルターで 500 m へ平滑化した結果、最小値 (Min) 9.0 , 最大値 (Max) 22.4 , 較差 (Range) 13.5 となった。この較差 (Range) は輝度温度 UHII と見なすことができないが、数値フィルター

によって空間代表性の低い輝度温度データを平均化すると、輝度温度差がかなり気温温度差 (7.8) に近付くことを改めて確認した。

3) 輝度温度データの最大値・最小値が出現する場所と土地利用の検証

次に、表 3 に示した輝度温度の最大値・最小値の較差は、なぜ輝度温度 UHII と見なすことができないかを検証する。輝度温度の最大値と最小値が都市のどの場所とどの土地利用にあるかを確認するために、30 m 解像度の輝度温度データにある上位 5 つのクールスポットとホットスポットをそれぞれ抽出し、表 4 に示した。また、それぞれのスポットが対応する細密数値情報での土地利用と所在する地区も併記した。

輝度温度の最小値は工業用地に 3 カ所、業務

表 4 輝度温度の最小値と最大値が出現する地区と土地利用

Table 4 Hot spots and cool spots in 30 m brightness temperature image.

Top 5 coolspots				Top 5 hotspots			
No	Land use	Zone	BT()	No	Land use	Zone	BT()
1	6	Z6	- 5.8	1	16	Z4	24.4
2	6	Z6	- 1.0	2	14	Z3	23.9
3	10	Z6	0.3	3	13	Z3	23.9
4	6	Z5	1.0	4	14	Z4	23.9
5	12	Z3	2.9	5	14	Z3	23.9

Land use : 6 . 工業用地, 10 . 商業業務用地, 12 . 公園緑地, 13 . 公共施設,
14 . 河川・湖沼, 16 . 海域 .

Land use : 6. industrial, 10. commercial land, 12. park, 13. public facility,
14. river and lake, 16. sea Zone : Z3 : <10 km, Z4 : 10 – 20 km,
Z5 : 20–30 km.

用地に 1 カ所, 公園緑地に 1 カ所となっている。クールスポットは 10 km 以内の圏域にも現れている。このことから, 輝度温度に現れる低温値は出現場所も土地利用も気温 UHI の概念に一致するとは限らないことがわかる。冬季の輝度温度データを利用しているため, 輝度温度の高温域は海域, その次は河川となっている。海や河川は中心市街の代表的土地利用でないことから, その輝度温度データを輝度温度 UHII の最大値とするのも妥当ではないことがわかる。

以上のことから, 30 m 解像度の画像においては排熱施設や冷却施設が輝度温度の高温値・低温値に大きな影響を与えているため, それを単純に比較し, 輝度温度 UHII を評価することはできない。これらのホットスポットやクールスポットは 500 m 解像度の輝度温度データにおいてはかなり平均化されるが, 現れる場所が UHI の概念に合わないため, それを輝度温度 UHII の計算に利用することができないわけである。

3) 地区別, 土地利用別の輝度温度分布の検証

表 2 には地区を行に, 土地利用を列に輝度温度の平均値を示していた。それによると, 各土地利用においては, 都心から郊外に向かって地区ごとに平均して 1 ずつ輝度温度の低減が見られた。

図 5 は表 2 の輝度温度平均値を地区別土地利用別にプロットしている。そこから森林(A)は各地区において農地(B)より高い温度を示している。

それは森林が農地より植生密度が高く, TM 夜間熱画像が撮影された午後 9 時頃には放射冷却効果があるからと推測する。このような森林による放射冷却効果は稲永ほか(1999)の研究にも確認されている²⁾。

中高層用地は 10 ~ 20 km 圏を除く各圏域において最大の輝度温度値を示している。農地は各圏域において最も低い温度を示している。低層用地は各地区において中高層用地より低い輝度温度を示している。工業用地は 10 ~ 20 km 圏において, 最も高い輝度温度を示している。

このように, 東京において 10 km 以遠の各圏域では農地が最も低い輝度温度平均値を示している。農地もまた郊外の代表的土地利用であることから, その輝度温度平均値を輝度温度 UHII の郊外参照とすることができる。

4) 輝度温度による UHII の計算

表 2 が示したように, 30 km 以遠の地区では農地の輝度温度平均値は 13.7 である。都心, 副都心, 10 km 以内および 20 ~ 30 km の各圏域では中高層用地の輝度温度平均値が最大で, それぞれ 19.6 , 18.4 , 17.8 , 15.6 となっており, 10 ~ 20 km 圏では工業用地の輝度温度平均値が最大で 16.8 となっている。これらの値を使って, 30 km 以遠の農地に対する各圏域の輝度温度 UHII を計算したのは表 2 の UHII 欄である。それによると, 東京の輝度温度 UHII は 20 ~

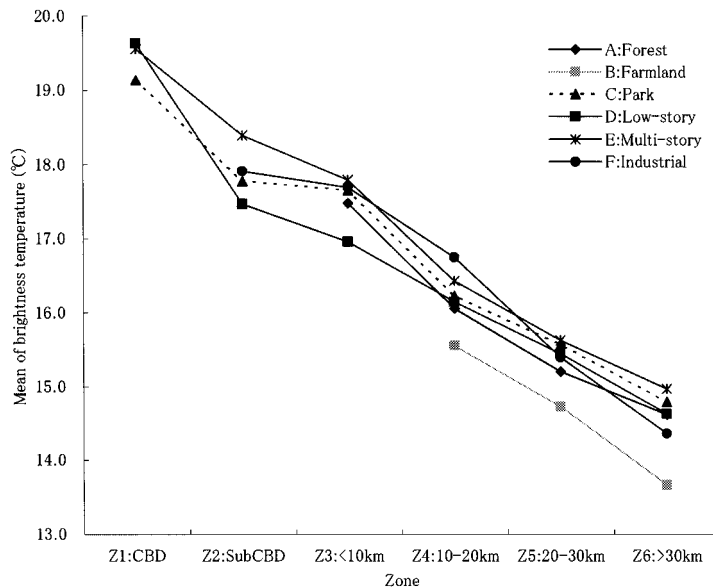


図 5 地区別土地利用別の輝度温度 .

Fig. 5 The gradient of brightness temperature by land use class.

30 km では 1.9 , 10 ~ 20 km では 3.1 , 10 km 以内では 4.1 , 副都心では 4.7 , 都心では 5.9 となっている。

輝度温度データは研究地域を均一の精度で面的にカバーしているため、任意の地区間、土地利用間の輝度温度差を評価することもできる。例えば、表 2 の UHII に示したように 20 ~ 30 km 圏では農地が最低の輝度温度平均値 (14.7) を持っている。そこを輝度温度 UHII の参照とすると、10 ~ 20 km 距離圏では工業用地が最高の平均輝度温度 (16.8) を持ち、その輝度温度 UHII は 2.1 である。10 km 以内では中高層用地の輝度温度平均値 (17.8) が最大で、輝度温度 UHII は 3.1 となる。同様に副都心、都心の輝度温度 UHII はそれぞれ 3.7 と 4.9 という結果を得る。

5) 気温 UHII による輝度温度 UHII の検証

輝度温度 UHII が気温 UHII とどれぐらい一致するかを検討するために、衛星撮影と同時に地上で観測した気温データも地区別、土地利用別に集計し、表 5 にまとめた。土地利用として公園緑地 (C)、工業用地 (F)、河川・湖沼 (G) および地区

として副都心 (Z2) には気温観測局がなかったため、気温データの統計を取ることができなかった。都心 (Z1) にも測定局がなかったが、そのすぐ近くに 18 番の観測局があったため (図 1 参照)、その観測値を表 5 の Z1 行 Total 欄に記入した。

30 km 以遠では農地が最低気温 (3.0) を持っている。森林は農地より平均気温が高い。これは輝度温度データが示した傾向と一致である。そこで、30 km 以遠の農地の気温を郊外の気温参照とすることにした。ほかの地区では、気温観測局は低層住宅地 (D) または中高層用地 (E) にしか設置されなかったため、この 2 種類の土地利用条件の気温の高いほうを用いて、気温 UHII を計算した。それは表 5 の UHII である。気温 UHII が 20 ~ 30 km では 4.4 , 10 ~ 20 km では 5.7 , 10 km 以内では 6.6 という結果を得た。都市全体では、18 番の測定局の値 (10.8) を使うと、気温 UHII が 7.8 となった。

これを表 2 の UHII と比べると、輝度温度 UHII は気温 UHII と比べて、UHII を小さく評価する傾向が見られた。その差も 2 前後あること

表 5 衛星画像と同時に地上で観測した気温データの地区別・土地利用別集計．

Table 5 The ground observed air temperature aggregated by zone and land use.

Zone		Land use class							Total	UHII	UHII
Name	Statistics	A	B	C	D	E	F	G			
Z1 :	Points										
CBD	Mean								10.8	7.8	3.9
Z2 :	Points										
SubCBD	Mean										
Z3 :	Points				5	14			19		
<10 km	Mean				5.8	9.6			9.4	6.6	2.7
Z4 :	Points				7	2			9		
10-20 km	Mean				8.2	8.7			8.3	5.7	1.8
Z5 :	Points				4	2			6		
20-30 km	Mean				7.4	6.9			7.2	4.4	0.0
A6 :	Points	2	1		5	4			12		
>30 km	Mean	3.2	3.0		5.8	6.6			5.4	0.0	
Total	Points	2	1		21	22			46		
	Mean	3.2	3.0		7.6	8.7			7.8		

から，輝度温度 UHII は気温 UHII の代替として使えるとは言い難い。しかし，両者は非常に大きく離れているわけでもないため，輝度温度 UHII は気温 UHII の参考として，十分に利用できることを確認した。

さらに重要なのは，輝度温度 UHII は都心から郊外に向かって低減していく傾向が，気温 UHII と一致していることである。これは輝度温度を気温の代替として地区間，土地利用間の温度特性を比較することができることを意味することであり，空間的に均一の精度で観測された輝度温度データの最も有力な利用方法ではないかと思われる。

V. 結 論

本論は画像解像度条件と土地利用条件のもとで，ランドサット/TM 熱画像によって輝度温度 UHII を計算し，気温 UHII との一致性を比較した。その結果，以下のいくつかの示唆を得ることができた。

1) 輝度温度データの画像解像度を気温が形成される空間スケールと同程度にすると，都心・副都心や鉄道沿線の市街地に発達する局地的ヒートアイランドを平準化することがなく，都市全体のヒートアイランドの空間構造をより鮮明に映す効果があることがわかった。

2) UHII は都市中心の代表的土地利用と郊外の代表的土地利用との間の温度差であることを前提として，輝度温度データから輝度温度の最大値と最小値を抽出して輝度温度 UHII を求める方法を示した。それによって計算した輝度温度 UHII は気温 UHII と比べてやや小さいが，UHII の実態を掴めるには十分意味あるものであることが確認された。

3) 輝度温度 UHII はそのまま気温 UHII の代替として使用することはできないが，都心から郊外に向かって UHII が低減する傾向は輝度温度 UHII も気温 UHII も一致することが認められた。これにより，均一の精度で一面に観測された輝度

温度データが任意の地区の間、任意の土地利用の間の温度特性を比較することに適していることが確認できた。

以上の知見は衛星熱画像を UHI の分析と評価にいつそう利用するみちを開くために有益であろう。一方、本論において、海面や河川の輝度温度が最大値を示すことや、郊外の森林が放射冷却効果を持つことなどは、冬季に撮影された画像データに見られる現象である。また、各地区区分や土地利用区分の輝度温度分布の違いは、東京の都市構造に依存するものとも思われる。輝度温度 UHI の評価と利用に関するより一般的な指針を出すためには、ほかの季節や空間構造の異なる都市も取り上げて、より多面的に比較・検討する必要があると思われる。

謝 辞

本研究は科学技術振興事業団戦略的基礎研究「都市ヒートアイランドの計測制御システム」プロジェクトの成果を踏まえて行なわれたものである。同プロジェクト観測チームの方々の精力的な地上観測網の整備とデータ整理がなければ本研究ができなかったはずである。ここに、観測チーム一同に御礼を申し上げる次第である。

注

- 1) 輝度温度データは本論の検証対象なのに、この場で利用するのは妥当でないとの見方もある。ここでは 30 m 解像度の輝度温度データを対象地域全体について、細密数値情報の 16 分類別に平均値と標準偏差を計算した。その結果は土地利用項目を統合するための参照に利用した程度である。これは本論の主題である 500m 解像度に対して、地区区分別・土地利用別に輝度温度データを計算・検証することに直接影響を与えないと思う。
- 2) 稲永ほか (1999) の研究では、衛星熱画像上の斜面温暖帯の形成は森林的土地利用が主たる要因であるが、標高や山腹に現れる逆転層などの気象条件の影響もあると指摘した。本論においては平坦地でも農地より森林の輝度温度が高いことが観察されているため、その形成には植生の密度の影響が大きいと推測した。また、一般に標高が高くなるにつれ、輝度温度が低下するが、気温にとっても同様な影響があるため、本論では特に標高の影響を補正する必要がないと思った。

文 献

- Carlson, T.N. (1986) Regional-scale estimates of surface moisture availability and thermal inertia using remote thermal measurements. *Remote Sensing Reviews*, **1**, 197-247.
- 稲永麻子・三上岳彦・渡邊真紀子・中山裕則 (1999) 斜面温暖帯形成要因分析へのランドサット/TM 夜間熱赤外画像の利用—赤城山南斜面における事例—。地学雑誌, **108**, 65-75.
- Kawashima, S. (1994) Relationship between vegetation, surface temperature, and surface composition in Tokyo region during winter. *Remote Sensing of Environment*, **50**, 52-60.
- 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.
- 三上岳彦 (1999) 首都圏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.
- Price, J.C. (1979) Assessment of the urban heat island effect through the use of satellite data. *Monthly Weather Review*, **107**, 1554-1557.
- 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. *International J. Remote Sensing*, **10**, 1699-1720.
- Smith, R.C.G. and Choudhury, B.J. (1990) On the correlation of indices of vegetation and surface temperature over south-eastern Australia. *International J. Remote Sensing*, **11**, 2113-2120.
- 田宮兵衛 (1995) 都市ヒートアイランド研究における地表面温度観測の意義と実際。気候影響・利用研究会会報, **11**, 82-87.
- NASDA (宇宙開発事業団) 編 (1986) 地球観測データ利用ハンドブック—ランドサット編。(財)リモートセンシング技術センター, 6-1 ~ 6-2.
- 山添 謙・牛山素行・三上岳彦 (1999) 東京における夏季および秋季の気温分布の日変化—高密度都市気候観測網データを用いた解析—。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。科学技術振興事業団 (JST), 16-22.
- 飯 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.

(2003 年 5 月 14 日受付, 2004 年 4 月 19 日受理)