

定点型観測と多変量解析によるヒートアイランド強度の日変化パターンの抽出 ～2013年8月の埼玉県熊谷市を対象として～

Extraction of Diurnal Variation Patterns of the Heat Island Intensity by the Fixed Point Observation and Multivariate Analysis : in August, 2013 in Kumagaya City, Saitama, Prefecture

中村 祐輔*・重田 祥範**

Yusuke NAKAMURA and Yoshinori SHIGETA

要旨：夏季の埼玉県熊谷市を対象に地上気温の定点型観測をおこなった。さらに、観測データに対して多変量解析を施し、統計学的手法からもヒートアイランド強度の日変化パターンの抽出を試みた。その結果、ヒートアイランド強度は、水田域を郊外とした場合では日中に極大（約4℃）、樹林地を郊外とした場合では夜間に極大（約3℃）を示した。このことは、郊外の代表地点の選定が、ヒートアイランド強度の知見に大きな影響を与えることを示唆している。また、主成分分析からも郊外における気温の日変化の違いが抽出された。したがって、熊谷市のヒートアイランド強度の日変化パターンは、土地被覆形態に大きく依存していることが明らかとなった。

キーワード：熊谷市、気温、ヒートアイランド、主成分分析

Abstract：In this study, the fixed point observation of surface air temperature was carried out during the summer in Kumagaya City, Saitama Prefecture. Furthermore, diurnal variation patterns of the heat island intensity were extracted from observed data by a multivariate analysis. As a result, the daily maximum of heat island intensity appeared in the daytime (about 4℃) when suburban stations were selected in the paddy field, but in the nighttime (about 3℃) in the case of the forest area. This suggests that the selection of suburb stations can have a strong influence on the interpretation of heat island intensity. In addition, the component referred to the inhomogeneity of diurnal temperature variation in the suburbs was obtained by principal component analysis. Therefore, it became clear that the diurnal variation of the heat island intensity in Kumagaya City greatly depends on the land cover status.

Key word：Kumagaya City, air temperature, heat island, principal component analysis

はじめに

ヒートアイランド現象は、郊外に比べて都市部の気温が高くなる熱大気汚染である。このヒートアイランドの発生頻度や強さを定量的に評価する指標として、ヒートアイランド強度（以下 HII）がよく用いられている。たとえば、河村（1977）は、東京の HII は夏季よりも冬季に大きいことを示している。一方、榊原（1999）は、長野県小布施町にて観測をおこなった結果、HII は5月に極大であることを報告している。また、関口（1970）は、多くの都市で日の出前後に HII が最大となると述べている。しかしながら、夏季と冬季で最大値を示す時刻が異なっているとの指摘もある（重田・大橋,2009）。このように、HII の特徴は各都市で大きく異なっており、一般的な結論は得られていない。さらに、中・小規模都市を対象としたヒートアイランド研究は、都市内の狭い範囲に限られたものがほとんどであり、観測点も高密度とはいえない。したがって、正確な HII を求め、その日変化パターンを議論するためには、広範囲かつ高密度な観測点

による連続したデータを取得し、気温の水平分布をより詳細に把握することが重要である。

そこで本研究では、2013年の夏季において、埼玉県熊谷市を中心とした、地上気温の定点型観測を多地点かつ広範囲で実施した。熊谷市は、夏季に国内でも有数の日最高気温が記録される地域として有名である。河村（1965）によると、熊谷市では約50年前からヒートアイランド現象の存在が認められており、その後もいくつかの研究がおこなわれてきている（たとえば、松本ほか,2002）。これらの報告から、ヒートアイランド現象が日中の高温を助長していることが予想される。そのため、HII の日変化パターンを把握することは、高温によってもたらされる熱中症や睡眠障害などの健康被害を議論するうえで無視できない。

本研究では2013年8月を中心に気温の実測データと多変量解析を併用して、夏季の好天静穏日における HII の日変化パターンを抽出する。

1. 研究の手法

* 立正大学院 地球環境科学研究科 環境システム専攻

** 立正大学 地球環境科学部 環境システム学科

1. 1 対象地域

埼玉県熊谷市は関東平野の北西部に位置し、面積約160km²、人口約20万人を有する中規模都市である。南部に江南台地および比企丘陵による高台（標高約40m）が存在するが、ほぼ平坦な地形を有している。熊谷市街地南縁部には、東西を横断する形で荒川が存在する。JR熊谷駅周辺は、市役所などの建物が多く存在し、商業あるいはオフィス街区である。また、熊谷市北部は“妻沼台地”と呼ばれ、土地被覆形態はおもに水田である。一方、荒川より南の地域においては樹林や畑が多く存在しており、上述の北部とは大きく異なった土地被覆形態を有している。

1. 2 観測概要

定点型による地上気温の観測を、熊谷市を中心に東西約16km、南北約16kmの範囲内、計46地点でおこなった。観測地点を図1に示す。観測は2013年8月1日から実施している。本研究では、年間の日最高気温が出現しやすい8月のデータを解析対象とする。気温の測定には、自然通風式シェルター（重田,2012）に温度センサー（RTR-502:T&D社）を組み込み使用した。測定間隔は2分であり、解析には10分ごとに中央平均した20分平均値を用いた。

本研究では、気温を観測する際に街区公園を利用するが、都市内に存在する大規模公園においては、周囲よりも低温となる“クールアイランド”の発生が報告されている（たとえば、成田ほか,2004；重田ほか,2013）。よっ

て、公園で観測された値を、都市部を代表とした気温とみなすことは危険である。上述の問題に対して、Chang *et al.* (2007) は、3ha未満の小規模な公園において、公園内外の気温に有意な差が認められないことを指摘している。そこで、本研究では約1ha未満の街区公園を選定し、気温観測をおこなった。観測機器は公園内に位置する街灯やポールを利用して、高度約2.5mに設置した。

1. 3 精度検証

本研究のように、複数のセンサーを用いる場合、各センサーの系統誤差を補正する必要がある。そこで、使用する温度センサーに対して、観測前に人工気象器（LH-300-r；日本医科器械製作所）を用いて検定をおこなった。その結果、各温度センサーの系統誤差は±0.2℃以内であった。その中で、最も平均的な値を示した温度センサーを熊谷地方気象台の付近に設置し、気象台の気温との比較観測をおこなった。期間は2013年8月1日から8月31日である。精度検証には、露場内で測定された気温の10分値を使用した。その結果を図2に示す。気象台の気温との測定値を平均すると-0.1℃（データ数n=4464、決定係数R²=0.9952）、標準偏差は0.3℃となり、20～40℃の範囲内では温度帯によって測定値が変化しないことが示された。この結果は、本研究で使用した観測機器が都市気候を議論するうえで十分な精度を有していることを意味している。以上の結果を踏まえ、各温度センサーの系統誤差を補正した。

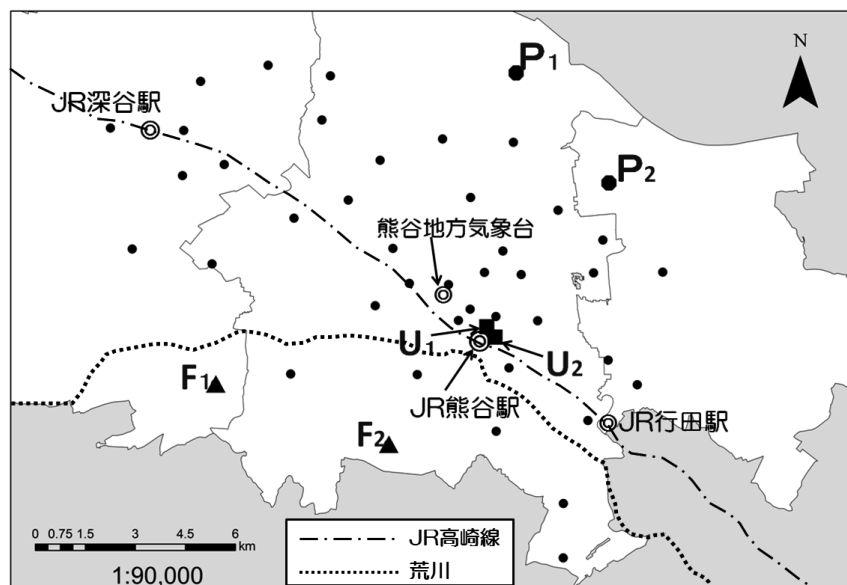


図1 観測地点 U₁,U₂は都市部, P₁, P₂は水田域, F₁,F₂は樹林地の観測点をそれぞれ示す

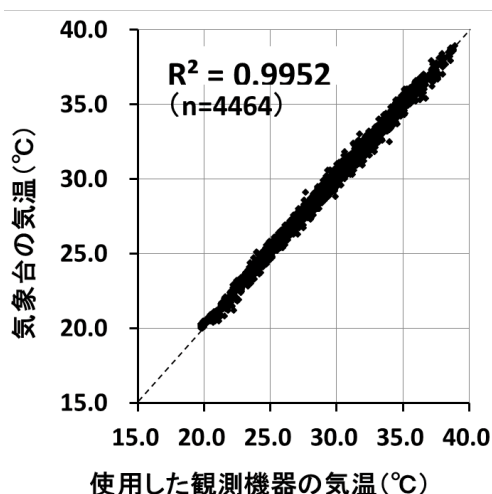


図2 精度検証の結果 点線は $x=y$ の直線

2. 結果と考察

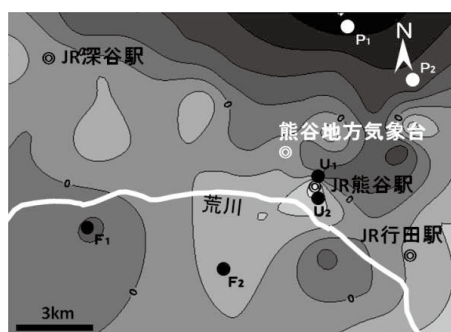
2.1 地上気温の空間偏差分布

ここでは、地上気温の水平分布について議論する。典型的な夏季の特徴をもった、2013年8月19日14時00分～翌20日5時00分における、地上気温の空間偏差分布を図3に示す。ここでいう偏差とは、全観測地点の平均気温から各観測地点の気温を差し引いたものである。以降、本研究で水平分布図を描く際は、空間内挿法にKriging法を用いた。

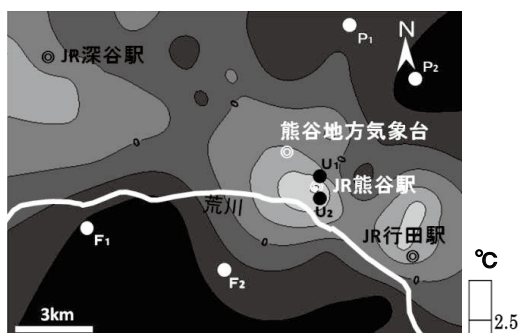
日中の気温偏差分布において、観測領域北東部に明瞭な低温域が認められ、周辺よりも約 2°C 低温となっている(図3a)。この低温域は、11～14時頃の日射が最も強い時間帯において明瞭となっている。その低温域周辺には水田が多く存在することから、日中において水面や稲の葉面で蒸発散が活発におこなわれているものと考えられる。そのため、太陽からの入力放射量(日射)の大部分が潜熱に変換され、周辺の気温上昇を抑制したものと推測される。このような、灌漑期において水田域が日中に低温となる現象は、榊原(1994)においても報告されている。

一方、22時頃には都市部の気温が周辺よりも 1.5°C 以上高くなり、JR熊谷駅周辺では同心円状の明瞭な高温域、いわゆる“ヒートアイランド”が出現する(図3b)。その直径は、約3kmである。その中で、最も高い気温を示したのは、JR熊谷駅から約100m北東の地点である。夜間において、この地点の気温は常に正の偏差であり、平均すると $+1.3^{\circ}\text{C}$ を示した。この地点の街区構造をみると、他の観測地点と比較して建造物が密集している(天空率

(a) 14時00分



(b) 22時00分



(c) 翌5時00分

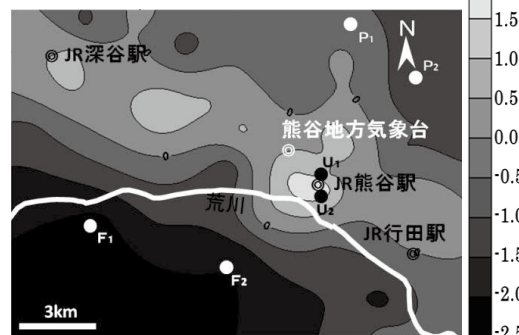


図3 2013年8月19日～20日の熊谷市周辺における地上気温の空間偏差分布

(a) 14時00分, (b) 22時00分, (c) 翌5時00分

0.35)。そのため、夜間は上向き長波放射が阻害され、放射冷却による気温低下が抑制されたものと推測される。さらに、ヒートアイランドの中心位置は、時間による変化が認められない(図3c)。一方で、日の出直前には、観測領域南部で明瞭な低温域が出現し、その値は周辺よりも 1.5°C 低い。この南部の低温域は、水田が多く存在する北東部の郊外と比較しても約 1.0°C 低い。榊原(1994)は、灌漑期の夜間における水田の熱収支に関して、放射

によって水表面が冷えても混合するために表面が冷えにくいことを挙げている。よって、樹林や畑が多く存在する南部の方が、北東部の郊外と比較して放射冷却による気温低下が活発であったと推測される。さらに、樹林地に関しては、鉛直方向の熱交換効率が大きいことや、大気のコールド面として寄与する葉面積が多いことから、夜間に顕著な冷気の生成源となることが示唆されている（重田ほか、2013）。このような要因から、北東部よりも顕著な低温域が、南部において発生したものと推測される。

2. 2 HII

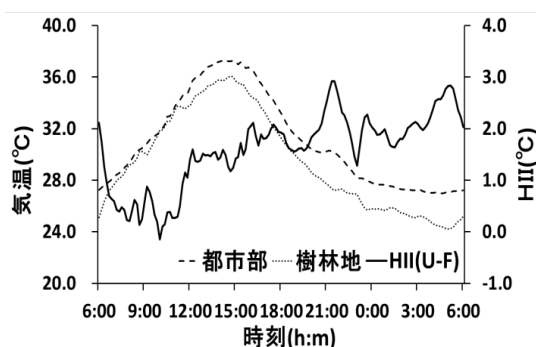
1) HIIの算出方法

HII は、発生頻度や強さを定量的に評価する指標として、多くのヒートアイランド研究の中で用いられてきた（たとえば、Oke,1973；菅原ほか、2005）。そこで本研究でも、ヒートアイランド現象を定量的に評価するためにHIIを算出する。算出にあたっては、観測地点の局所的な影響を避けるため、複数地点の気温を平均して用いることとした。都市部の代表地点は、地上気温の空間偏差分布および、観測地点周辺の土地利用形態から、JR 熊谷駅周辺の U_1 、 U_2 を選定した（図 1）。また、観測領域北東部および南部の郊外においては、異なる時刻に低温域が出現した。そのため、北東部の水田域 P_1 、 P_2 、南部の樹林地 F_1 、 F_2 （図 1 を参照）を異なる郊外として選定し、HII をそれぞれ算出することとした。

2) HIIの時間変化

典型的な好天静穏日の特徴をもった、8月19日の6時00分から20日6時00分における、気温およびHIIの時間変化を図4に示す。樹林地の日較差（日最高気温と日最低気温の差）は 11.8°C である（図4a）。その一方で、都市部の日較差は 10.3°C であり、樹林地と比較して 1.5°C 小さい。また、時間帯ごとの気温変化量に着目すると、日の出後3時間（6時00分～9時00分）において、樹林地の気温は $+1.7^{\circ}\text{C}/\text{hour}$ の割合で上昇する。しかし、都市部の気温は $+1.2^{\circ}\text{C}/\text{hour}$ であり、樹林地に比べ上昇率が小さい。一方、その後3時間（9時00分～12時00分）に関しては、樹林地が $+1.2^{\circ}\text{C}/\text{hour}$ 、都市部が $+1.4^{\circ}\text{C}/\text{hour}$ の割合で上昇する。このことから、日射による都市部の気温上昇量のピークは、樹林地と比較して約3時間遅いことがわかる。この都市部の気温上昇が遅れる要因として、都市部と郊外の間で、熱容量に差が生じていることが考えられる。都市部と郊外を構成する代表的な物質の比熱は都市部の方が郊外よりも1.5～2倍ほど大きい（近藤・劉 1994）。さらに、郊外と比較すると都市部の建物の高さは高く、日射を受ける表面積も相対的に広くなる。そのため、都市部の熱容量の総和も郊外に比べて

(a) 都市部および樹林地



(b) 都市部および水田域

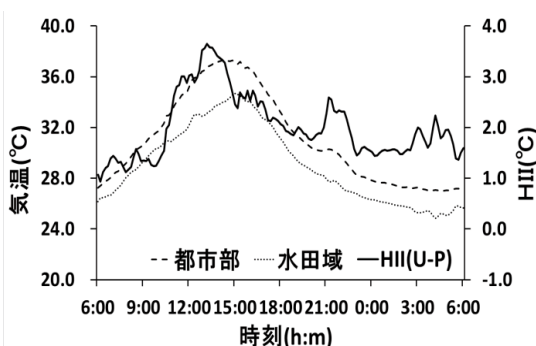


図4 2013年8月19日6時00分～20日6時00分における代表地点の気温およびHIIの時間変化
(a) 都市部および樹林地, (b) 都市部および水田域

大きくなることが予想される。これらの原因により、都市部の気温上昇が遅れたものと推測される。また、樹林地を郊外とした場合のHIIは、夜間に最大値をとり（19日21時20分に最大値 2.9°C ）、日の出頃に急激に小さくなる。

図4bには、都市部および水田域の気温変化と水田域を郊外とした場合のHIIを示す。水田域の気温の日較差は 9.9°C であり、その他の地域と比較して小さい。樹林地の場合と同様に気温の変化量に着目すると、水田の気温は、日の出後から正午（6時00分～12時00分）まで $+1.2^{\circ}\text{C}/\text{hour}$ の上昇を示しており、都市部や樹林地のような上昇率の時間差は生じていない。これは、水面の比熱が大きいことによる熱容量の増加と、上述した蒸発散効果が生じたためと考えられる。また、水田域を郊外とした場合のHIIは日中に大きく、最大値は19日13時10分の 3.7°C であった。その一方で、3つの地域において気温の上昇率や日較差に明瞭な違いが認められているものの、日最高気温を記録する時刻に大きな差はない（15時頃）。この

要因の一つに、移流効果が挙げられる。熊谷市周辺では15時頃から南東または南南東の卓越した風が吹き始め。熊谷地方気象台では15~21時頃にかけて平均約4m/sの風(測定高度:16.5m)が記録されている。関東地方一帯のアメダスや大気測定局で測定された風のデータを鑑みると、この風は関東地方で吹いている広域的な海風であると判断できる。大和ほか(2011)は、関東平野における広域的な海風が、夏季日中の気温へ与える影響について調査している。その結果、海風前線が通過した後では、気温上昇が鈍化し気温低下がはじまることを指摘しており、本研究の結果とも整合性が認められる。これらのことから、海風の移流効果により、日最高気温が記録される時刻に差が生じなかったものと推測される。

一方、郊外を樹林地および水田域とした場合のHIIを比較すると、日中のHIIは水田域を郊外とした場合の方が大きく、平均で+1.1℃、最大で2.5℃(19日11時10分)の差が生じている。夜間のHIIは、樹林地を郊外とした場合の方がやや大きい、平均で+0.3℃であり、日中の場合よりもその差は小さい。さらに、HIIの最大差は日中の値よりも小さく、約半分の1.2℃であった。このように、土地被覆形態が異なっている場所を代表値として選出することで、HIIの最大値や時間変化に大きな差が生じることが明らかとなった。この点に関しては他の都市においても報告例があり(たとえば、Grimmond et al,1993; 榊原,1999), HIIを算出するうえで無視できない。

2. 3 統計学的手法による解析

1) 解析方法

これまで、ヒートアイランド現象の実態把握を目的として、様々な手法による研究がおこなわれてきた。たとえば統計的な手法として、Kim and Baik (2005)は、ソウルにおける気温データに対して主成分分析をおこない、ヒートアイランド現象と土地利用や人工排熱との関連を明らかにしている。さらに、重田・大橋(2009)は、岡山市における地上気温の観測結果に対して主成分分析をおこない、ヒートアイランド現象およびクールアイランド現象を異なる主成分として抽出している。このように、HIIの日変化パターンを明らかにするための、統計的なアプローチとして、主成分分析は有効な手段である。そこで本研究においても、熊谷市で発生しているヒートアイランド現象の時空間パターンを統計的に明らかにするため、ヒートアイランドが顕著に発生すると考えられる好天静穏日を対象に、多変量解析の一種である主成分分析をおこなった。解析には、2013年8月の好天静穏日(8月11, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 28, 29, 30日)にお

ける、各観測地点の正時の気温をコンボジットしたものを使用した。データ数は、44(地点)×24(時刻)である。また、重田・大橋(2009)と同様に、「時刻」について固有ベクトルを求め、「地点」と「日」に対して主成分得点を求めることとし、出発行列には相関係数行列を用いた。

2) 寄与率

主成分分析の結果、寄与率は第1主成分で76.0%、第2主成分で14.7%となり、第2主成分までで気温の日変化パターンの約90%を説明することができた。第3主成分以降に関しては、寄与率が5.0%以下となったため、有意な結果ではないと判断した。したがって、解析には第2主成分までを取り上げることにする。

3) 第1主成分

第1主成分の固有ベクトルは、日中に極大値-0.14をとるものの、1日をとおして変化が小さい(図5)。ここで、図6aに第1主成分得点の空間分布を示す。図中のJR熊谷駅周辺では、郊外と比較して値が極端に小さくなっている。この分布は、図3b, cに示したヒートアイランド分布と酷似している。これらより、第1主成分は昼夜ともに都市域が郊外に比べて高温であることを示しているものと推測される。

4) 第2主成分

第2主成分の固有ベクトルは、日中には正、夜間には負の値をとる、特徴的な変化を示している(図5)。また、日の出直後における値の上昇が著しく、6時00分から9時00分にかけて+0.17/hourの上昇率を示す。一方で、夜間にはそのような大きな変動は認められない。第2主成分得点は、北東部の水田域で値が小さく、南部の樹林地において値が大きい(図6b)。したがって、第2主成分は土地被覆形態の違いにともなう、気温の変化率を示しているものと推測され、HIIの違いに関する議論と一致する。

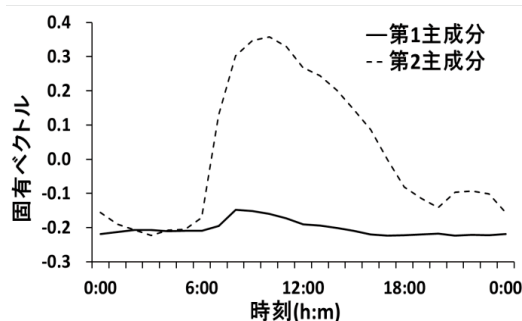
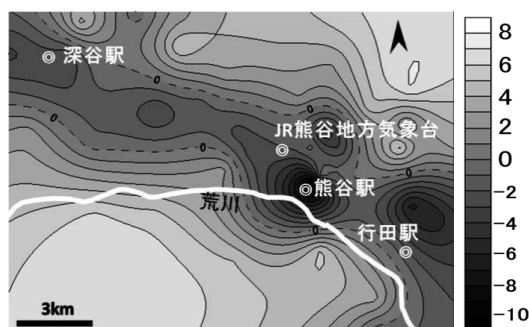


図5 主成分分析で得た固有ベクトルの時間変化

(a) 第1主成分



(b) 第2主成分

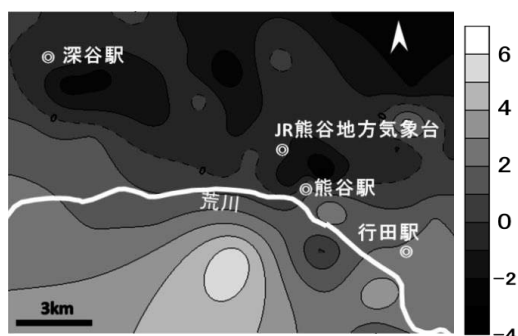


図6 2013年8月の好天静穏日における主成分得点の空間分布 (a) 第1主成分, (b) 第2主成分

おわりに

夏季の埼玉県熊谷市を対象に、地上気温の定点型観測および多変量解析を併用して、HII の日変化パターンを抽出した。

水田域を郊外とした場合の HII は日中に極大を示し(13 時頃に約 4℃)、樹林地を郊外とした場合は夜間に極大を示した(21 時頃に約 3℃)。これより、土地被覆形態が異なっている場所を代表値として選出することで、HII の知見に大きな違いが生じることが明らかとなった。

さらに、観測データを用いた主成分分析の結果、第 1 主成分では昼夜ともに都市域が郊外に比べて高温であることが示された。一方、第 2 主成分は土地被覆形態にともなう気温の変化率を抽出し、それぞれの郊外における熱容量の差が端的に示された。

これらの結果から、夏季の熊谷市における HII の日変化パターンが、土地被覆形態に大きく依存していることが明らかとなった。

謝辞

本論文の執筆にあたり、有益な御意見を頂きました立正大学地球環境科

学部渡来靖佳教授に感謝の意を表します。また、定点型観測点の設置場所を提供して頂きました熊谷市役所、深谷市役所、行田市役所の方々に深くお礼申し上げます。

引用文献

- Chang, C.R., M.H. Li and S.D. Chang (2007) A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Urban Plan.*, 80, 386~395.
- Grimmond C.S.B., T.R. Oke and H.A. Cleugh (1993) The role of "rural" in comparisons of observed suburban-rural flux differences. *IAHS Publ. No 212*, 165~174.
- 河村 武 (1965) 熊谷市における気温分布の解析. *地理学評論*, 37, 387~392.
- 河村 武 (1977) 都市気候分布の実態. 都市気候に関する最近の展望, 気象研究ノート, 133, 26~47.
- Kim, Y.-H. and J.-J. Baik (2005) Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul. *J. Appl. Meteor.*, 44, 591-605.
- 近藤裕昭, 劉 發華 (1994) 1 次元都市キャノピーモデルにおける都市の熱環境の研究. *大気環境学会誌*, 33 (3), 179~192.
- 松本 太, 福岡義隆, 後藤慎太郎 (2002) 熊谷市における都市域の形態や構造の変化に伴うヒートアイランドの変化. *環境情報科学論文集*, 16, 387~392. 天気
- 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にじみ出し現象. *地理学評論*, 77 (6), 403~420.
- Oke, T.R. (1973) City size and the urban heat island. *Atmos. Environ.*, 7, 769~779.
- 榊原保志 (1994) 越谷市に見られるヒートアイランド強度—郊外が水田の場合—. *天気*, 41 (9), 515~523.
- 榊原保志 (1999) 長野県小布施町におけるヒートアイランド強度と郊外の土地被覆との関係. *天気*, 46 (9), 567~575.
- 関口 武 (1970) 都市気候学. *天気*, 17 (3), 89~96.
- 重田祥範 (2012) 自然通風式シェルターと小型グローブ温度計の開発：熱中症指標 WBGT 観測への適用性について. *日本生気象学会雑誌*, 49 (3), 83.
- 重田祥範, 大柳唯太 (2009) 岡山市を対象とした細密な気象観測によるヒートアイランド強度の解析. *天気*, 56 (9), 443~454.
- 重田祥範, 高岡利行, 大柳唯太, 亀掛川幸浩, 平野勇二郎 (2013) 都市内の大規模緑地がもたらす大気冷却効果—大阪城公園の事例—. *日本生気象学会雑誌*, 50 (1), 23~36.
- 菅原広史, 池 東旭, 遠峰菊郎 (2005) ヒートアイランド強度算定のための都市気温分布の検討：ソウル（韓国）の例. *天気*, 52 (2), 119~128
- 大和広明, 三上岳彦, 高橋日出男 (2011) 夏季日中における首都圏のヒートアイランド現象に海風が与える影響. *地学雑誌*, 120 (2), 325~340.