

オープンスペースで実施した定点観測によって捉えられた 夏季晴天日におけるつくば市のヒートアイランド： 都市内外の気温差に関する不確実性の評価

Urban heat island phenomenon observed in open spaces in Tsukuba city on clear summer days:
An evaluation of uncertainty in urban-rural temperature difference

日下 博幸*¹ 高根 雄也*² 阿部 紫織*² 高木 美彩*^{2,3}
Hiroyuki Kusaka Yuya Takane Shiori Abe Midori Takaki

重田 祥範*⁴ 大橋 唯太*⁵ 布和 宝音*^{2,6}
Yoshinori Shigeta Yukitaka Ohashi Buhe Baoyin

- *¹ 筑波大学計算科学研究センター Center for Computational Sciences, University of Tsukuba
*² 筑波大学大学院生命環境科学研究科 Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba
*³ 横浜市 Yokohama City (現所属)
*⁴ 立正大学地球環境科学部 Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University
*⁵ 岡山理科大学生物地球学部 Faculty of Biosphere-Geosphere Science, Okayama University of Science
*⁶ 千葉大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, Chiba University (現所属)

Corresponding author: Hiroyuki Kusaka, kusaka@ccs.tsukuba.ac.jp

ABSTRACT

A field experiment was performed in 25 parks and school yards in Tsukuba city, Ibaraki Prefecture, for 6-9 August 2008 to examine city-scale urban heat island phenomenon on clear summer nights. In addition, uncertainty in urban-rural temperature difference associated with observation site selection is evaluated. The results show that a center of heat island with the highest temperature is found in downtown Tsukuba near the Tsukuba station. Secondary centers are found around the Kenkyu-gakuen station, as well as in the boundary between Tsukuba and Tsuchiura cities. Nocturnal temperatures observed at four rural sites are similar to each other, but temperatures in four sites in the city center varied by $>1^{\circ}\text{C}$ depending on time. The uncertainty range in temperature difference between particular sites inside and outside of urban area may be as large as 2.2°C .

キーワード: ヒートアイランド, ヒートアイランド強度, 定点観測, 公園, 校庭
Key Words : Heat island, Heat island intensity, Measurement, Park, School yard

1. はじめに

ヒートアイランド現象とは、都市とその周辺部の地上気温の分布を描いたときに、都心に近いほど高温になり、その等温線の形状が地図上の島の等高線のそれと似ていることから名づけられたと言われている。ヒートアイランド研究の歴史は長く、とりわけ、観測研究の歴史は長い。吉野⁽¹⁾⁽²⁾によれば、1800年代から1920年代までは観測所のデータから都市と郊外の気温差を認めた時代で、それ以後は自動車の移動観測によって気温の水平分布を詳細に調査する時代に移っていったと報告されている。1950年代から1970

年代になると数多くの観測が精力的に行われるようになった。1970年代までの研究についてはいくつかの優れた文献にまとめられている⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。1980年代くらいまでの観測は、主として中小都市を対象としており、ヒートアイランド現象が最も明瞭に認められる冬季晴天日の夜間に行われていた。(脚注1: ヒートアイランドが最も明瞭に認められるのは夏季晴天日の日中だと指摘する報告もあるが⁽⁷⁾、それは、周囲が水田に囲まれているなど都市と郊外の地表面熱収支に大きな違いがある場合である。一般的には、大気成層の安定度が強まる冬季晴天日の夜間の方が明瞭である。大気成層の安定度が強いほどヒートアイランドが明瞭になるこ

とは、過去の観測事実⁽⁸⁾・理論的な解釈⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾・数値実験⁽¹¹⁾によって支持されている。)日本におけるヒートアイランド研究が、中小都市から大都市へ、冬季晴天日の夜間の観測から夏季晴天日の日中の観測にシフトしていったのは、ヒートアイランドが人間生活に与える影響、例えばエネルギー消費量の増大や熱中症患者数の増加が主として夏季の日中に深刻化し、社会問題になってきたためである。なお、国内⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾および海外⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾の最近の研究動向や成果についてはレビューが行われているので、そちらを参照していただきたい。

健康問題という視点でヒートアイランド問題をとらえる場合、夏季晴天日の日中だけでなく夏季晴天日の夜間にも目を向ける必要がある。例えば、国立環境研究所が行ったアンケート調査では、暑い日に経験する心理的・生理的なストレスとして「眠れない」が最も多い回答となっている⁽¹⁸⁾。また、井原らは⁽¹⁹⁾、アンケート調査結果に基づく問題比較型影響評価手法によって、熱中症・だるさ・睡眠困難の増加が住民の健康に与える影響度合いを比較し、睡眠困難は熱中症の増加と同程度の影響をもたらしていると報告している。

ヒートアイランドの観測手法は移動観測と定点観測に大別される。自動車による移動観測手法は、この手法が提唱された1930年代以降、数多くの観測で採用されてきた⁽²⁰⁾⁽²¹⁾⁽²²⁾⁽²³⁾⁽²⁴⁾。観測費用がそれほどかからない、少人数で実施できる、測器の設置場所を必要としないなどの長所があることから、現在でも広く利用されている⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾。しかしながら、移動観測には短所もある。例えば、時間変動の問題である。移動観測の場合、観測中の時間帯はすべて同一時刻と見なすか、観測データを時間内挿しなくてはならない。時間内挿が許されるのは観測期間中の気温変動が小さい場合であり、そうでない場合は問題となる。別の短所として、気温分布の時間変化を追うのが難しいことがあげられる。自動車による移動観測を一日のうち何度も行うことは大変であり、そのため気温の日変化を捉えることが難しくなる。最後の一つは、道路上の気温しか観測できないことである。道路上の気温は、自動車の排熱や道路沿いの建物の影響を受けやすく、気温の空間代表性は場所によって大きく異なる可能性がある⁽²⁸⁾。

例えば、大橋ら⁽²⁹⁾や高野ら⁽³⁰⁾は東京都心の街区内で移動観測を実施し、同じ街区内でも日向日影の違いや交通量の違いなどにより気温差が2~3℃あると報告している。これらのことを考えると、都市全体規模のヒートアイランド現象を捉える調査および都市全体の影響によって生じるヒートアイランド強度(Urban Heat Island Intensity, UHII)を評価する調査には、空間的に高密度なオープンスペースでの定点観測が望ましいと思われる。最近では、安価で小型のログ付き温度センサーの普及、小・中学校にある百葉箱の利用、小型で軽量の放射よけシェルターの開発⁽³¹⁾⁽³²⁾、持ち運びが可能な自動気象観測システム(AWS)の普及、あるいは都市内外での大気汚染やフラックス観測を目的と

した大型プロジェクト⁽³³⁾⁽³⁴⁾に付随して、定点観測手法も徐々に増えつつある⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾⁽⁴¹⁾。しかしながら、これまでの移動観測の実施数に比べればまだまだ少ない。とりわけ、ヒートアイランド研究に適した、都市と郊外の境界が明瞭で平野に位置している中規模都市で観測した例は大都市に比べるとずっと少ない。また、定点観測のほとんどが小・中学校の校庭、道路、建物の屋上で行われており、より観測環境の局所的な影響を受けにくいと考えられる気象官署程度の広さを持つ緑地、例えば公園などで行われた例は非常に少ない⁽⁴²⁾⁽⁴³⁾。(脚注2: 公園に設置した場合も観測される気温は周囲の樹木の影響を受ける可能性はあるが、葉の熱容量は小さくそれ故に周囲の温度とよくなじんでいると考えられるため、公園での観測時の樹木の影響は、道路での観測時の建物影響よりも小さいと考えられる。)観測時の建物影響よりも小さいと考えられる。)

中規模都市内のオープンスペースでの空間詳細な気温観測は、ヒートアイランド研究だけでなく、地球温暖化も含めた気候変動研究一般にも重要である。よく知られているように、都市域における過去の気温上昇量は、主として大規模場の気候変動とヒートアイランドによってもたらされてきた。日本の気象庁は、都市化の影響が小さいとみなせる全国17地点の気象官署で測定された気温データを用いて、地球温暖化による気温上昇量を算出している。ただし、この17地点には、年平均UHIIが0.4℃~1.5℃程度⁽⁴⁴⁾⁽⁴⁵⁾、年間最大UHIIが1.8℃~3.0℃程度⁽⁴⁶⁾であると考えられている人口20万人を超える水戸や、冬季のUHIIが1℃~4℃程度⁽⁸⁾であると考えられている人口30万人を超える長野などが含まれている。

本研究では、以上のようなヒートアイランドおよび地球温暖化間に係わる学術的・社会的な背景を考慮して、関東平野に位置する人口約20万人の中規模都市である茨城県つくば市を対象として、夏季夜間のヒートアイランド現象の実態を大小25箇所の公園、校庭などにおける定点観測によって明らかにする。さらには、地点選択にともなう都市内外の気温差の不確実性を評価する。また、別途、公園の近くにある道路や住宅街でも気温観測を行い、地表面の被覆状態や周囲の建物が都市内外の気温差に及ぼす影響も評価する。

2. 観測手法と対象地域の概要

2.1 観測手法の概要

気温の測定には重田ら⁽³²⁾によって開発された自然通風式の放射よけシェルターにサーミスタ温度計(おんどとり Jr.RTR-52; T&D社)を組み込んだものを使用する。図1に本研究で使用した自然通風式放射よけシェルターの設置イメージを示す。定点観測の場合、小・中学校の百葉箱を利用することが多いが、ここでは、全地点において図1の放射よけシェルターを利用する。これにより、校庭であっても建物から離れた場所で観測することが可能となる。

(脚注 3：百葉箱は校庭の片隅や校舎のすぐ近くに置かれていることが多く、このような場所に設置された百葉箱で気温を測ると建物の影響を受けてしまう可能性がある。)なお、設置の際は、公園や校庭で遊ぶ人のじゃまにならないように地上高さ 2.5m に設置する。一般的に、自然通風式の放射よけシェルターを用いて測定される気温はその地点の風速や日射量に依存する誤差を持つ⁽⁴⁷⁾。しかしながら、本研究で対象としている観測範囲はおおむね 15km と狭く、環境場の風や日射量はこの範囲内ではほぼ様とみなせることから、自然通風式放射よけシェルターの短所の顕在化を緩和するため測器の設置には以下のような配慮を行った。すなわち、風通しがよく局所的な日影の影響のない公園、校庭、道路沿いの街灯等を設置場所として選択した。さらに、データ解析時には、日射の影響の出やすい日中の気温については地点間の気温差のみ議論し、個々の気温の絶対値を議論しないとす。

観測網は、公園 16 地点、学校 7 地点、公民館・児童館 2 地点(表 1, 図 2)によって構成されている。これらの基本観測地点に加えて、地表面状態の違いによる気温差を評価するために、つくば市の中心に位置する中央公園前の道路(中央通り, 図 2)および大清水公園前の道路(土浦学園線, 図 2)でも観測を実施した。さらには、観測地点周囲

に存在する建物の影響を評価するため、地表面は芝地に覆われているものの、測器の周囲に建物が存在する場所でも観測を実施した。観測データのサンプリング間隔は 2 分である。

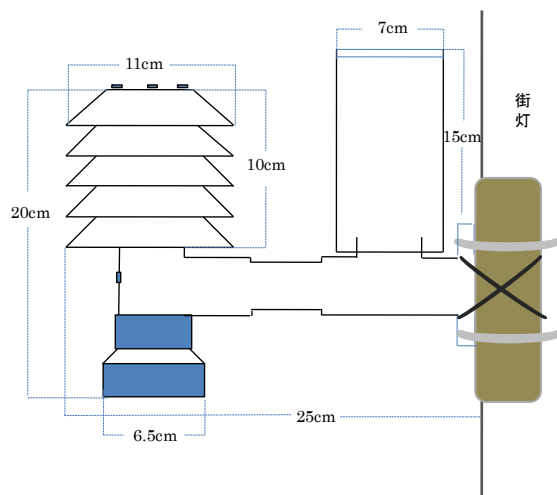


図 1 放射よけシェルターの概要.

表 1 観測地点一覧.

| 番号 | 地点名 | 備考 | 番号 | 地点名 | 備考 | 番号 | 地点名 | 備考 |
|----|--------|----|----|-----------|----|----|---------|----|
| 1 | 斗利出小学校 | | 10 | 谷田部中 | | 19 | 研究学園駅 1 | |
| 2 | 栄児童館 | | 11 | 島名公民館 | | 20 | 研究学園駅 2 | |
| 3 | 九重小学校 | | 12 | 小貝川スポーツ公園 | ○ | 21 | いちよの丘公園 | ◎ |
| 4 | 並木公園 | | 13 | 川口公園 | | 22 | 中央公園 | ◎ |
| 5 | 常総学園高 | | 14 | 台山公園 | ○ | 23 | 大清水公園 | ◎ |
| 6 | 乙戸小 | | 15 | 上原児童公園 | | 24 | 竹園西公園 | |
| 7 | 梅園公園 | | 16 | 大穂中 | | 25 | 小野崎公園 | ◎ |
| 8 | 栗原小 | | 17 | 筑波北部公園 | ○ | | | |
| 9 | 高野台公園 | | 18 | 花畑近隣公園 | ○ | | | |

◎：中心公園代表点 ○：郊外公園代表点

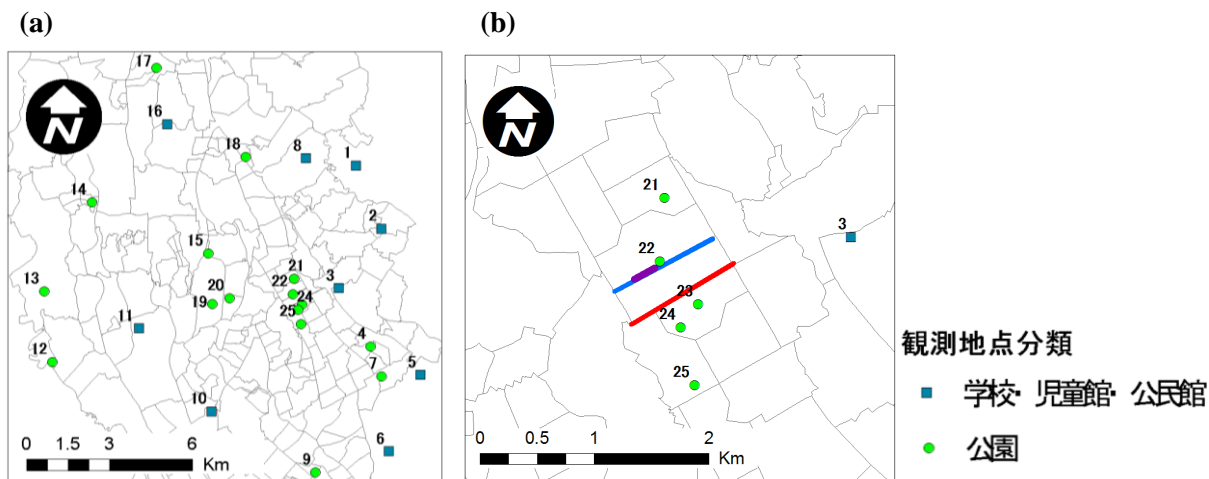


図 2 観測地点の位置。(a) 対象地域全域、(b) つくば駅付近の拡大図。青線は中央通り、赤線は土浦学園線。

2.2 対象地域の概要

茨城県つくば市は人口約 20 万人の中規模都市である。つくば駅付近の町字境界あたりの人口は 1km^2 あたり 5,000 ~ 10,000 人程度である⁽⁴²⁾。5,000 人以上の地区はどこも住宅地である。ALOS/AVNIR-2 データ (図 3) から算出した 2006 年 8 月のつくば市中心部の緑被率はおおよそ 40% 未満であり、つくば駅に近くの商業地や住宅街では 25% 未満と特に低い⁽⁴²⁾。一方、周囲の緑地率はおおよそ 25-60% 程度であり、西側や東側の一部の地域で特に高い。地形は全体的に平坦で標高差は小さい。つくば市全域は筑波研究学園都市と呼ばれており、つくば駅を中心に南北に広がる約 2700ha の地域は研究学園地区と呼ばれている。しかしながら、本稿では研究学園駅を中心とした新しい市街地と区別するため、以後、つくば駅を中心とした研究学園地区のことをつくば市の中心部と呼ぶことにする。

2.3 解析対象日

本研究では、2008 年 8 月の一ヶ月間、観測を実施した。解析対象期間は、日本列島が太平洋高気圧に覆われた 8 月 6 日 9 時から 8 日 9 時までとする (図 4)。つくばアメダスで観測された 8 月 6 日、7 日、8 日の日照時間はそれぞれ 6.3 時間、12.1 時間、11.1 時間であり、7 日から 8 日にかけてよく晴れていた (図 5a)。また、地上風速は最大でも 3.6m/s と昼夜を通して風は弱かった (図 5b)。これらのことから、

この期間は、ヒートアイランドが出現しやすい天候だったことがわかる。

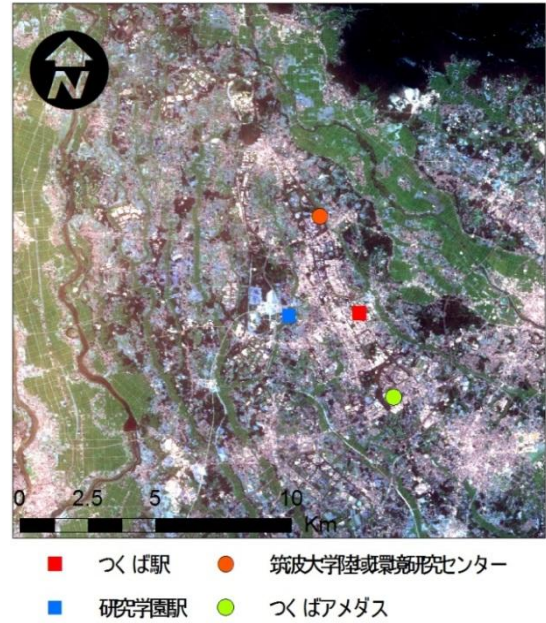


図 3 観測対象地域の ALOS 衛星画像。

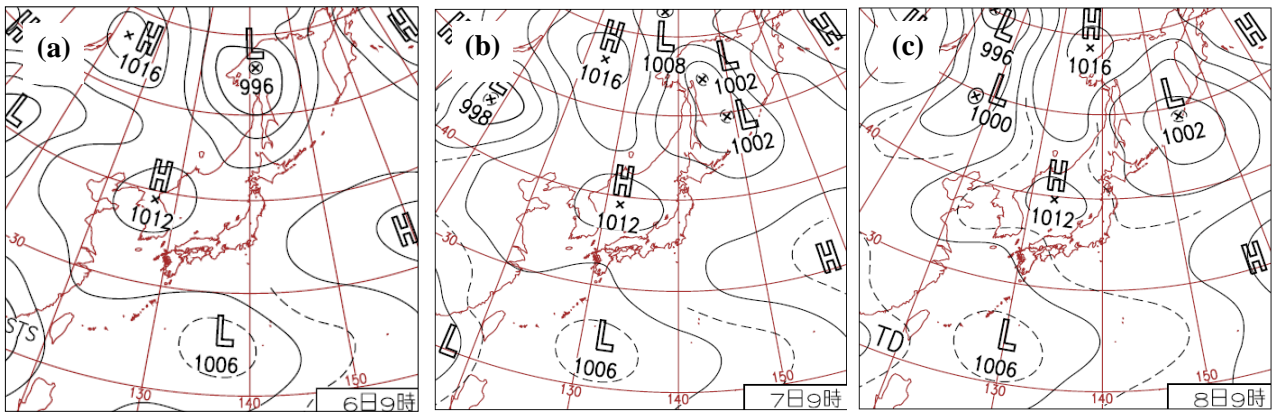


図 4 2008 年 8 月 6 日から 8 日までの 9 時の地上天気図。(a) 8 月 6 日 9 時、(b) 7 日 9 時、(c) 8 日 9 時。

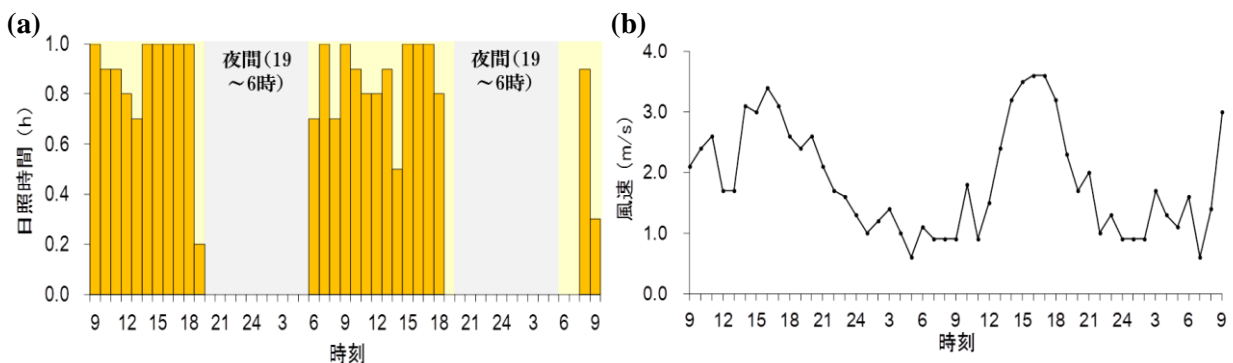


図 5 つくばアメダスで観測された日照時間と風速 (2008 年 8 月 6 日 9 時~8 日 9 時)。(a) 日照時間、(b) 風速。

3. 結果

3.1 地上気温の水平分布と接地層内の気温の鉛直分布

8月7日および8日の午前5時における地上気温の水平分布をそれぞれ図6aと図6bに示す。図6aから、つくば市のヒートアイランドの中心はつくば駅付近であり、気温が最も高い地点はいちちょうの丘公園と竹園西公園であることがわかる。この2地点の気温は25.6~26.0°Cで、郊外に比べると1.5~2.0°C程度高い。つくば駅付近の次に気温が高いのは、研究学園駅付近とつくば市と土浦市の境界付近である。郊外に比べると1.0~1.5°C以上高い。

つくば市で最も開発が進んでいる地区がつくば駅付近であること、研究学園駅周辺も近年開発が進んでいること、つくば市の市街地は南北方向に広がっておりその南側には中規模都市である土浦市があること、8月7日の結果だけでなく翌日の結果(図6b)もこのような結果となっていることから、本研究で実施した観測によって夏季晴天日の夜

間のヒートアイランド現象を捉えることができたと思われる。

図7は、筑波大学陸域環境研究センターで観測された接地層内の気温の鉛直分布である。参考のため、つくば市中心部および郊外で観測した地上気温の値も示している。8月7日午前5時に観測された気温の鉛直分布を見ると、地上気温が23.6°Cで、地上高さ30m以下で気温減率+7.3°C/100mの強い接地逆転が認められる。つくば市中心部で観測された4地点の気温は両日とも25~25.5°Cの範囲にあることから、中心部の逆転層は郊外に比べてかなり弱いことが推測される。これは中心部での夜間放射冷却の抑制が、水平方向にはヒートアイランド現象として、鉛直方向には接地層内の逆転層発達弱さとなって顕在化したものと考えられる。翌8日午前5時にもほぼ同程度の地上気温の値とほぼ同程度の強さの逆転層が認められる。

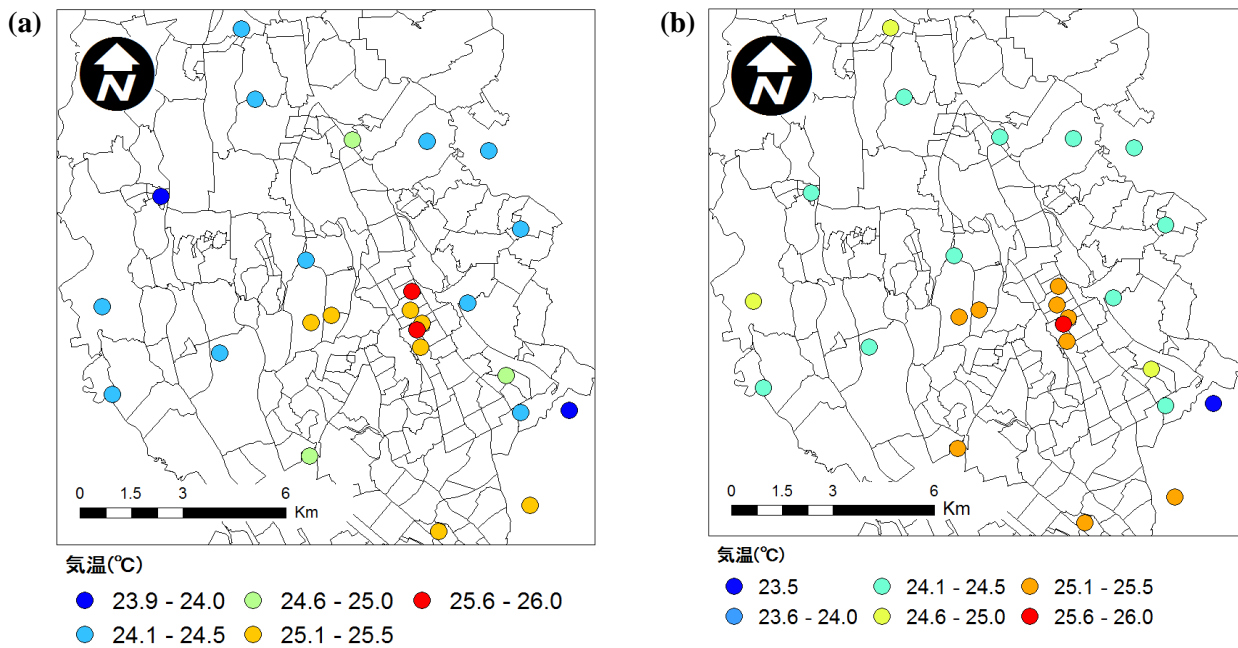


図6 観測から得られた地上気温の水平分布。(a) 2008年8月7日午前5時、(b) 2008年8月8日午前5時。

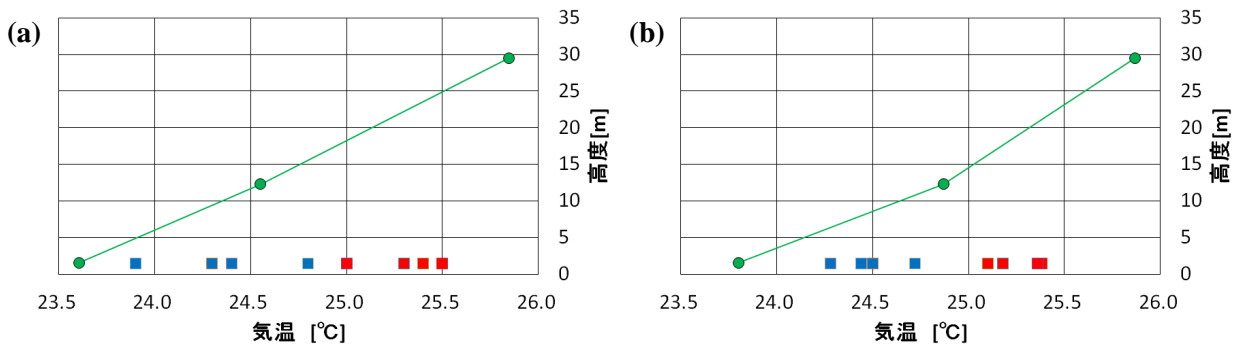


図7 筑波大学陸域環境研究センターの鉄塔で観測された気温の鉛直分布。(a) 2008年8月7日5時、(b) 2008年8月8日5時。緑色の●は鉄塔、青色の■は郊外の代表的な公園4カ所、赤色の■は中心部の代表的な公園4カ所で観測された値。

3.2 ヒートアイランド強度の日変化

都市が気温に及ぼす影響を定量的に評価する指標として、ヒートアイランド強度がある。図 8a は、つくば駅前にある中央公園とつくば市西部に位置する小貝川運動公園の観測値を用いて計算された UHII の日変化である。両日とも逆転層が完全に解消される午前 9 時から日最高気温起時である 15 時くらいまで都市と郊外の気温差はほとんどなく、その後、気温差が急速に大きくなっていく。夕方以降の UHII はおおむね 1.5°C~2.0°C 程度である。UHII の最大値は 8 月 8 日 7 時 58 分に観測された 2.7°C であるが、これはあくまで観測された瞬間値、測器の時定数を考えてもせいぜい 30 秒平均値なので、乱れの影響によるものと考えられる。10 分平均値にした場合、解析期間中の最大 UHII は 8 月 7 日 2 時 50 分に観測された 2.4°C となる。

日中の乱れの影響や観測地点依存性を軽減するために、都市内と郊外それぞれ代表的な 4 地点（比較的良好な観測環境にある地点）の平均値から算出した UHII の日変化を図 8b に示す。基本的には図 8a と類似した日変化となっているが、4 地点のアンサンブル平均値になっているため、10 分以下の細かい変動が個々のデータ同士で打ち消され小さくなっている。それでも細かい変動を完全に打ち消し

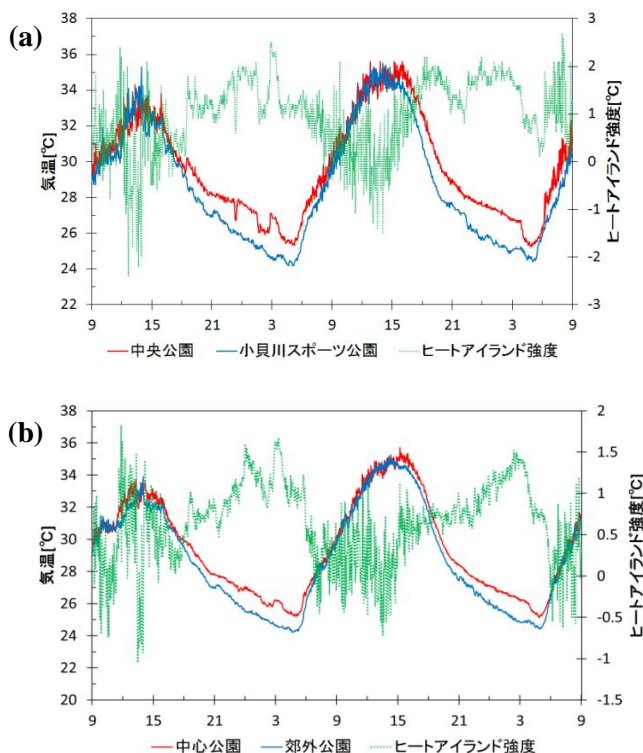


図 8 地上気温およびヒートアイランド強度の日変化 (2008 年 8 月 7 日 9 時~9 日 9 時)。

(a) 赤線は中央公園，青線は小貝川運動公園で観測された気温。緑線はその差によって定義された場合のヒートアイランド強度。(b) 赤線は中心部の代表的な公園 4 カ所の平均値，青線は郊外の代表的な公園 4 カ所の平均値，緑線はその差。

ているわけではなく、8 月 6 日の 13 時付近と 14 時付近に大きな変動が認められる。この変動を無視すると、UHII の最大値は 8 月 6 日 11 時 48 分の 1.8°C であり、10 分平均値の場合は 8 月 7 日 3 時 10 分の 1.6°C となる。前述したように、UHII の日変化は図 8a も図 8b もおおよそ類似しているが、細かく見ると異なる点もある。例えば、夜間、時間が経つほど UHII が強くなっていくという傾向は図 8a にはなく、図 8b のみで認められる。これは、日中だけでなく、夜間においても、UHII の時間変化に地点依存性があることを意味している。

4. ヒートアイランド強度の不確実性

4.1 地上気温の空間非一様性

本節では、地上気温の空間非一様性について議論する。図 9a は、郊外の観測地点のうち、観測環境として比較的良好と思われる 4 地点の地上気温の日変化を示したものである。夜間の気温に関しては、中心部と異なり、地点間の差が非常に小さいことがわかる。図 9b はつくば市中心部の観測地点のうち、前節の UHII 評価に用いた 4 地点の地上気温の日変化を示したものである。日中は、風の乱れなどにより気温が大きく変動しており、夜間は大気が安定になるため乱れが弱くなり気温変動が小さくなっていることがわかる。ただし、夜間といえども地点間の気温差が 1°C 以上認められる時間帯も存在する。日射量・風速・人工排熱の違いなどにより、昼夜を問わず、街区内の気温は空間的に非一様であることが古くから指摘されており⁽⁴⁾、現在でも注目を集めている⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾。本研究で示された都市内気温の非一様性は、観測した場所が公園であり、一般的には空間代表性が確保されていると考えられるオープンスペースであることを考慮すると大変興味深い現象だと言える。

図 10a は、8 月 7 日 5 時における、都市内の特定の 1 地点と郊外の特定の 1 地点の気温差の頻度分布(地点数分布)である。都市内の観測地点と郊外の観測地点の組み合わせがサンプル数となる。都市と郊外の気温差の最小値は -0.4°C、最大値は +1.9°C、平均値は +0.9°C である。都市と郊外の気温差の最大値と最小値の差は +2.2°C である。8 月 8 日 5 時の都市と郊外の気温差の最小値は -0.2°C、最大値は +2.1°C、平均値は +0.8°C となっており、都市と郊外の気温差の最大値と最小値の差は +2.3°C である。8 月 8 日 5 時の結果も傾向としてはおおよそ上記と同じである(図 10b)

このことは、気温観測地点が都市と郊外でそれぞれ 1 地点ずつしかない場合、2 地点の気温差から推定される UHII には最大で 2°C 程度の不確実性が含まれることを意味している。

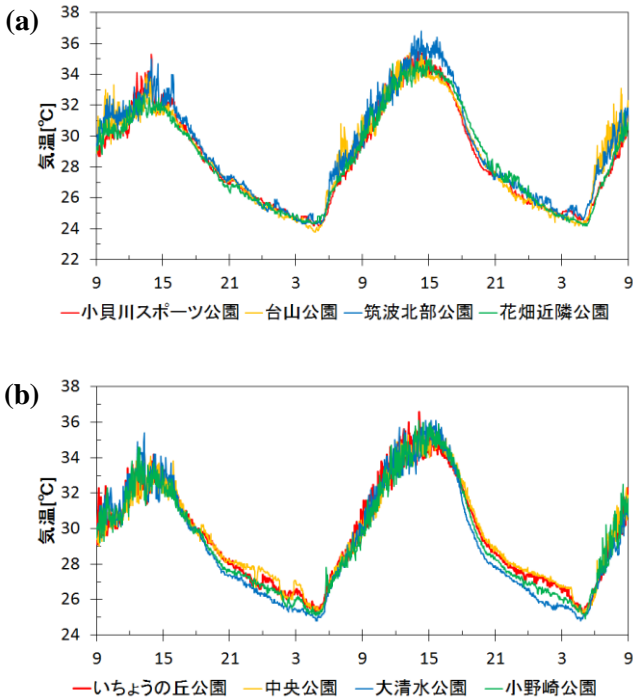


図9 地上気温の日変化(2008年8月6日9時~8日9時). (a) 郊外の4地点(小貝川スポーツ公園, 台山公園, 筑波北部公園, 花畑近隣公園), (b) 中心部の4地点(いちょうの丘公園, 中央公園, 大清水公園, 小野崎公園)における観測値.

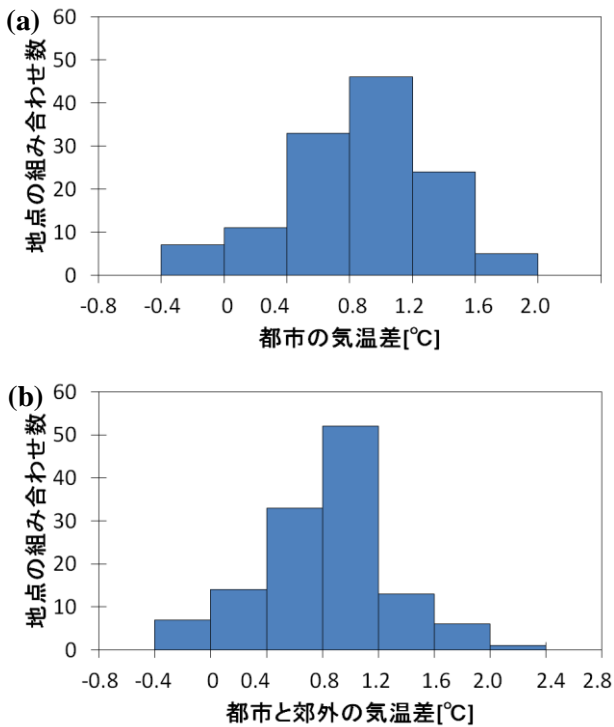


図10 都市と郊外の気温差ごとの地点数の組み合わせ数. サンプル数は都市と郊外の観測地点の組み合わせの数となっている. (a) 2008年8月7日5時, (b) 2008年8月8日5時の値.

4.2 地上気温に及ぼす観測環境の影響

これまででは、公園内で観測された気温を用いてヒートアイランドを議論してきた。本節では、観測地点の環境、例えば、地表面被覆状態や観測地点周囲の建物が地上気温に及ぼす影響を評価する。図11aは、つくば市中心部に位置する中央公園とその前を通る中央通りで観測された地上気温、およびそれらの気温差の日変化である。中央公園と中央通りの気温には系統的な差はほとんど認められない。よく移流拡散されているためだと考えられる。一方、大清水公園とその前を通る土浦学園線で観測された気温には、夜間に1.5°C前後の明瞭な差が認められる(図11b)。この気温の日変化の違いは、都市と郊外の気温の日変化の違いとよく似ている。また、気温差の値も都市と郊外の気温差で定義されるUHIIと同程度である。

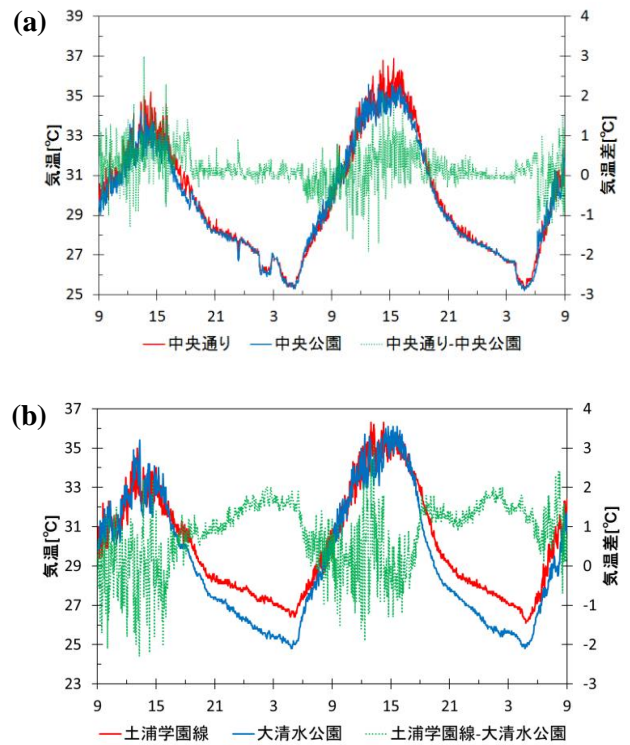


図11 公園と道路の気温および両者の気温差(2008年8月6日9時~8日9時).

(a) 赤線は中央通り, 青線は中央公園, 緑線はその差.
 (b) 赤線は土浦学園線, 青線は大清水公園, 緑線はその差.

地表面被覆状態が異なる中央公園と中央通りの気温には系統的な差はほとんどなかった。それぞれの観測地点における天空率は、中央公園で0.73, 中央通りで0.67, 大清水公園で0.63, 土浦学園線で0.50であり、大清水公園と土浦学園線の天空率の差は0.13である。土浦学園線の天空率が相対的に低い理由は観測地点の北側に大きな建物が存在するためである。この建物による風速の低減, 長波放射の射出などが土浦学園線の夜間気温の低下を阻害していると考えられる。また、土浦学園線の交通量は中央通りに比べて

相対的に多い。自動車からの人工排熱も土浦学園線の気温を他の地点よりも高くしている可能性がある。これらの結果は、都市中心部において、道路の気温は公園の気温よりも非一様性が強い可能性があることを示唆している。

5. まとめ

本研究では、中規模都市における夏季夜間のヒートアイランド現象とヒートアイランド強度の評価を目的として、茨城県つくば市の公園・校庭・公民館からなる合計 25 カ所の観測地点において、2008 年 8 月の一ヶ月間、気温の定点観測を実施し、その中で高気圧に覆われた 8 月 6 日 9 時から 8 日 9 時のデータを解析した。さらには、地点選択に伴う都市と郊外の気温差の不確実性について評価した。本研究から得られた結果を以下にまとめる。

- (1) つくば市のヒートアイランドの中心は、つくば駅付近であった。これは、つくば駅周辺が最も都市化が進んでいる地区であることと整合的である。また、つくば駅付近の次に気温が高いのは、研究学園駅付近とつくば市と土浦市の境界付近であった。これは、研究学園駅周辺も近年開発が進んでいること、つくば市の南部には中規模都市である土浦市が隣接しているためだと考えられる。
- (2) 筑波大学陸域環境研究センターで観測された接地層内の気温の鉛直分布とつくば市中心部で観測された地上気温から、つくば市中心部の逆転層は郊外に比べてかなり弱いことが分かった。
- (3) 郊外の代表 4 地点における夜間の地上気温はほとんど同じであった。一方、中心部の代表 4 地点における夜間の地上気温は、時間帯によっては 1°C 以上異なっていた。このことは、夜間の都市内の気温差は、都市と郊外の気温差と同程度になりうることを意味している。
- (4) 都市内の特定の 1 地点と郊外の特定の 1 地点の組み合わせ毎に気温差を調査した結果、選択地点に伴う都市と郊外の気温差の不確実性の幅は 2.3°C に達することが分かった。
- (5) 観測地点の環境が異なる大清水公園と土浦学園線の間には、夜間 1.5°C 前後の明瞭な気温差が認められた。この気温差は、建物や自動車排熱の有無の違いによって生じたと考えられる。

謝辞

本研究は日本学術振興会の科学研究費補助金（若手研究（B）20700667）、日本学術振興会の科学研究費補助金（基盤研究（B）22340141）、および文部科学省の委託事業「気候変動適応研究推進プログラム」の支援により実施された。

参考文献

- (1) 吉野正敏, 都市気候学小史(1), 天気, 4-1 (1957a), pp.21-25.
- (2) 吉野正敏, 都市気候学小史(2), 天気, 4-2 (1957b), pp.51-55.
- (3) 河村武, 都市気候—とくに heat island を中心として—, 気象

研究ノート, 98 (1968), pp.142-157.

- (4) 大後美保・長尾隆, 都市気候学, 朝倉書店 (1972), 214pp.
- (5) 河村武, 都市気候に関する最近の展望, 気象研究ノート, 133 (1977), 256pp.
- (6) H. E. Landsberg, The Urban Climate, Academic Press (1981), America.
- (7) 榊原保志, 越谷市に見られるヒートアイランド強度—水田の場合—, 天気, 41-9 (1994), pp.515-523.
- (8) 榊原保志・伊藤由可, 長野市における夜間気温分布と天空率, 風の関係, 地理学評論, 71 (1998), pp.436-443.
- (9) P. W. Summers, An urban heat island model. Its role in air pollution problems with application to Montreal. Paper presented to the 1st Canadian Conference on micrometeorology, Tronto, (1965).
- (10) 田宮兵衛・大山秀樹, 小集落に夜間発生するヒートアイランドの実態と成因について, 地理学評論, 54 (1981), pp.1-21.
- (11) A. Martilli, Numerical study of urban impact on boundary layer structure: Sensitivity to wind speed, urban morphology, and rural soil moisture, J. Appl. Meteor., 36 (1986), pp.1377-1391.
- (12) H. Kusaka, Recent progress on urban climate in Japan, Geograph. Rev. Japan, Ser. B, 81 (2008), pp.361-374.
- (13) 中川清隆, わが国における都市ヒートアイランド形成要因, とくに都市ヒートアイランド強度形成要因に関する研究の動向, 地学雑誌, 120 (2011), pp.255-284.
- (14) 神田学 (編), 都市の気象と気候, 気象研究ノート, 224 (2012), 296pp.
- (15) J. Arnfield, Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island, International Journal of Climatology, 23 (2003), pp.1-26.
- (16) M. Kanda, Progress in urban meteorology, J. Meteor. Soc. Japan, 85B (2007), pp.363-383.
- (17) C. S. B. Grimmond, Progress in measuring and observing the urban atmosphere, Theor. Appl. Climatol., 84 (2006), pp.3-22.
- (18) 国立環境研究所, 温暖化に関するアンケート調査(平成 15 年度実施), http://www.nies.go.jp/impact/jp_quest.html (2003)
- (19) 井原智彦・日下博幸・原政之・松橋隆治・吉田好邦, 問題比較型影響評価手法を用いた都市気温上昇に伴う軽度の健康影響の推定, 日本建築学会環境系論文集, 76 (2011), pp.459-467.
- (20) 福井英一郎・矢沢大二, 最近における都市気候研究の展望, 地理学評論, 30 (1957), pp.36-54.
- (21) 高橋百之, 日本の中小都市における気温分布と家屋密度, 地理学評論, 41 (1959), pp.695-703.
- (22) 田宮兵衛, 小気候・局地気象—特に移動観測の方法について—, 天気, 26-10 (1979), pp.633-640.
- (23) 佐橋謙, 自動車による気温の移動観測における観測誤差—特に自動車の影響を中心に—, 天気, 30 (1983), pp.509-514
- (24) 吉野正敏・甲斐憲次・中川慎治・黒坂裕之, 筑波研究学園都市域の気温分布観測, 筑波の環境研究名, 7 (1983), pp.170-180.

- (25) 榑原保志・三枝あかね, 晴天日と曇天日のヒートアイランド強度の違いと夜間ヒートアイランドの成因, 天気, 49-7 (2002), pp.533-540.
- (26) 菊池信・堀越哲美, 夏季と冬季における名古屋の都市気候観測調査, 日本建築学会環境系論文集, 595 (2005), pp.83-89.
- (27) 鍋島美奈子・古崎靖朗・中尾正喜・西岡真稔, 移動観測によるヒートアイランド現象の実測 大阪平野の夜間気温分布, 日本ヒートアイランド学会論文集, 1 (2006), pp.23-29.
- (28) H. Sugawara, K. Narita and T. Mikami, Representative air temperature of thermally heterogeneous urban areas using the measured pressure gradient, *J. Appl. Meteor.*, 43 (2004), pp.1168-1179.
- (29) 大橋唯太・玄地裕・亀卦川幸浩, 東京都心の街区内気温の空間分布とその形成要因について, 環境情報科学論文集, 17 (2003), pp.59-64.
- (30) 高野武将・成田健一・三上岳彦・菅原広史・本條毅, 街路空間における放射量と温度の空間平均と変動—新宿御苑周辺市街地を例として, 環境情報科学論文集, 17 (2003), pp.47-52.
- (31) 酒井敏・梅谷和弘・飯澤功・伊藤文・小野耕作・矢島新・飴村尚起・森永修司, 都市熱環境観測システムの開発研究, 天気, 56-5 (2009), pp.337-351.
- (32) 重田祥範・畔柳秀匡・大橋唯太・平野勇二郎・亀卦川幸浩・外岡秀行・塚本修, 大阪平野を対象とした街区構造ごとの大気熱環境特性—小型計測機器を用いた定点型観測—, 日本ヒートアイランド学会第3回全国大会要旨集, (2008), pp.98-99.
- (33) M. W. Rotach, R. Vogt, C. Bernhofer, E. Batchvarova, A. Christen, A. Clappier, B. Feddersen, S. -E. Gryning, G. Martucci, H. Mayer, V. Mitev, T. R. Oke, E. Parlow, H. Richner, M. Roth, Y. -A. Roulet, D. Ruffieux, J. A. Salmond, M. Schatzmann and J. A. Voogt, BUBBLE — an Urban Boundary Layer Meteorology Project, *Theor. Appl. Climatol.*, 81 (2005), pp.231-261.
- (34) R. Moriwaki and M. Kanda, Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, water vapor and CO₂ over a suburban area. *J. Appl. Meteor.*, 43 (2004), pp.1700-1710.
- (35) 三上岳彦・安藤春夫・横山仁・山口隆子・石井康一郎・塩田勉・森島済・小島茂喜・泉岳樹, 東京都区内における夏季ヒートアイランドの時空間構造, 東京都環境科学研究所年報, (2004), pp.11-17.
- (36) 菅原広史・池東旭・遠峰菊郎, 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 (2005), pp.119-128.
- (37) 榑本慶子・谷口一郎・野邑奉弘, 2005年の大阪市域における気温分布の特徴とヒートアイランドの発生状況, 日本ヒートアイランド学会論文集, 1 (2006), pp.30-35.
- (38) 境田清隆・江越新・倉持真之, 仙台のヒートアイランドと海風の影響, 地学雑誌, 120-2 (2011), pp.382-391.
- (39) J. D. Fast, J. C. Torcolini and R. Redman, Pseudovertical Temperature Profiles and the Urban Heat Island Measured by a Temperature Datalogger Network in Phoenix, Arizona, *J. Appl. Meteor.*, 44 (2005), pp.3-13.
- (40) S. D. Gedzelman, S. Austin, R. Cermak, N. Stefano, S. Partridge, S. Quesenberry and D. A. Robinson, Mesoscale aspects of the Urban Heat Island around New York City, *Theor. Appl. Climatol.*, 75 (2003), pp.29-42.
- (41) Y. H. Kim and J. J. Baik, Spatial and Temporal Structure of the Urban Heat Island in Seoul, *J. Appl. Meteor.*, 44 (2005), pp.591-605.
- (42) 日下博幸・大庭雅道・鈴木智恵子・林陽生・水谷千亜紀, 冬季晴天日におけるつくば市のヒートアイランド: 予備観測の結果, 日本ヒートアイランド学会論文集, 4 (2009), pp.10-14.
- (43) 佐藤真由美・大橋唯太, 岡山県倉敷市における夏季ヒートアイランド観測の長期観測, *Naturaliste*, 15 (2011), pp.23-30.
- (44) 朴(小野) 恵淑・安成哲三・沖理子・尾田敏範, 地上気温変動の季節性に着目した都市気候成分の解析, 地理学評論, 67A (1994), pp.561-574.
- (45) H. Kato, A statistical method for separating urban effect trends from observed temperature data and its application to Japanese temperature records, *J. Meteor. Soc. Japan*, 74 (1996), pp.639-653.
- (46) 福岡義隆, 都市の規模とヒートアイランド, 地理, 28 (1983), pp.34-42.
- (47) R. Nakamura and L. Mahrt, Air temperature measurement errors in naturally ventilated radiation shields, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 22 (2005), pp.1046-1058.

(Received Apr 6, 2012, Accepted Jul 27, 2012)