



調査報告

## 土地利用と人間活動が 都市中心部の気温と暑さ指数の分布特性に及ぼす影響

Impacts of Land Use and Human Activity on  
Spatial-Pattern Characteristics of Temperature and the Heat Index in the Central City Area

日下 博幸・猪狩 浩介・小久保 礼子・佐藤 拓人・ドアン グアン ヴァン

KUSAKA Hiroyuki, IGARI Kosuke, KOKUBO Reiko, SATO Takuto and DOAN Quang Van

(2018年9月26日受付 2019年1月28日受理)

本研究は、商業地、住宅地、緑地という異なる土地利用を1~2 km以内に有する東京都渋谷区を対象に、土地利用や人間活動の違いが気温とWBGTの非一様性の形成に及ぼす影響を観測によって明らかにした。観測結果から、日中では、住宅地の気温が商業地に比べてやや高く、緑地が最も低いことが明らかとなった。夜間は、商業地の気温が最も高く、緑地が最も低かった。また、緑地では夜間に接地逆転層が認められる一方で、商業地では夜間に少なくとも観測範囲内（地上から高度33 mまで）では絶対不安定となっていた。熱画像観測は、昼夜を問わず、商業地と住宅地で同程度の表面温度であることを示した。これらの結果は、商業地の大きな表面積・建物体積・熱容量による大きな熱慣性と人工排熱によると考えられる。この結果は、多層都市キャノピーモデルを用いた数値実験からも支持された。WBGTの場合は、気温とは異なり、商業地と緑地で大きな差はなかった。これは、緑地の高い湿度が原因であることが分かった。

This study revealed the impacts of land use and anthropogenic heat on the heterogeneous spatial patterns of temperature and the thermal index in Shibuya ward in Tokyo, which contains a commercial area, residential area, and park within 1–2 km<sup>2</sup>. Observations revealed that temperature in the residential area was slightly higher than that in the commercial area during the daytime. The park had the lowest temperature of the three. At night, temperature in the commercial area was the highest and that in the park was the lowest. Additionally, observations showed that a surface inversion layer developed over the park at night, whereas a surface unstable layer occurred during the nighttime from the ground level to a height of at least 33 m over the commercial area. Measurement with a thermal camera showed that there were almost no differences in the surface skin temperature between the commercial and residential areas during the day and night. It is considered that these results are caused by the large thermal inertia associated with the large urban surface area, large building volume, and large heat capacity. These results were supported by numerical experiments with a multilayer urban canopy model. Unlike the temperature, there was almost no difference in the wet-bulb globe temperature between the commercial area and the park, resulting from higher humidity in the park.

キーワード: ヒートアイランド, 土地利用, 温熱指標, WBGT, 観測

Key words: urban heat island, land use, heat index, wet-bulb globe temperature, observation

### I はじめに

近年、熱中症リスクとの関係から、都市の熱環境（暑熱環境、温熱環境）に対して社会の関心が高まっている。

日本における都市の夏季の熱環境に関する観測研究は、ヒートアイランドの調査に代表されるように、都市域とその周辺の気温分布や、都市と郊外の気温差や表面温度の差に着目して行われてきた。（例えば、近

藤ほか 1993; 榊原 1994; 横山ほか 2005; Kusaka 2008; 中川 2011; 三上 2006; 重田・大橋 2009; 日下ほか 2012; 岡田ほか 2014; 中島ほか 2018）。建築工学分野では、クリマアトラス（日本建築学会 2000）に代表されるように都市計画に資するための気温分布や風系の現地調査がなされてきた（例えば、岩井ほか 2002; 菊池・堀越 2005; 鍋島ほか 2006）。また、より快適な街作りに資するために、気温分布と緑地の関連性や、緑地や河川や地形からの冷気が周囲の気温に及ぼす影響などに

着目して研究も行われてきた（例えば、片山ほか 1990; 山田 1994; 浜田・三上 1994; 境田・鈴木 1994; 本條ほか 1998; 竹林ほか 2001; 橋本・堀越 2003; 成田ほか 2004; 菅原ほか 2006; 三坂・成田 2012）。

近年、欧州を中心に、Local Climate Zone (LCZ) と呼ばれる概念に基づいて都市内部の詳細な土地利用区分と気温の関係が、精力的に再調査されている（例えば、Stewart and Oke 2012; Stewart et al. 2014; Leconte et al. 2015）。しかしながら、モンスーンアジアに属する日本の気候環境や、都市街区構造、人工排熱は欧州とは大きく異なるため、わが国においても都市内部の詳細な土地利用区分と気温の関係について独自の調査が必要である。大橋ほか（2009）は、大阪市街地で気温分布と土地利用の関係を調査し、住宅街区の方が商業街区に比べて気温の日較差が大きくなることを確認した。梅干野ほか（1995）は、航空機観測を行い、日中の表面温度は木造建物地区、RC建物地区、大規模緑地の順に高温となり、夜間はRC建物地区、木造建物地区、大規模緑地の順になることを示した。これらの結果と過去の詳細な熱画像解析の結果は（例えば、梅干野ほか 1981）、街区を構成する建物の建材と天空率の違いが土地利用毎の気温や表面温度の日変化の違いを生み出していることを示唆している。Tsunematsu et al. (2016) も、航空機観測から、東京駅周辺の日中の表面温度が、住宅街、オフィス街、緑地の順で高温となるということを確認している。

最近では、温熱指標の調査も行われるようになってきた。幡谷ほか（2007）は仙台の商業地で気象観測を行い、街路樹の有無によって道路上のSET<sup>\*1)</sup>が9℃も異なることを明らかにした。Nakayoshi et al. (2015) は、多治見市街地でSET<sup>\*</sup>の分布を調査し、駅前商業地で熱中症リスクが高い時間帯でも河川敷ビオトープではリスクのない環境が形成されることを明らかにした。大橋ほか（2010）は、大阪の中心部の商業地、住宅地、大規模緑地でWBGT<sup>2)</sup>を測定し、日最大値で見ると住宅地、草地、商業地の順で高く、住宅地と商業地の差は最大で2.5℃に達することを明らかにした。梶元（2009）やOhashi et al. (2014) は、大阪市や東京23区全域のWBGTマップ作成を行っている。しかしながら、都市中心部における土地利用と温熱指標の関係に着目した観測研究は少なく、まだ十分とは言えない。

都市の熱環境の緩和と適応のためのより良い街づくりという社会のニーズが年々高まっていることを考えると、日本においても、東京23区スケールよりもさらに空間的に詳細な、都市中心部におけるマイクロスケールの夏季気温・温熱指標と土地利用分布の関係に着目したさらなる研究が望まれる。

東京都渋谷区（図1）は、日本有数の繁華街や、閑静な住宅地、大規模緑地である代々木公園を有しており、さらには、商業地には小規模緑地も存在する（図2）。3つの異なる土地利用が全て隣接しているこの地域は、Nakayoshi et al. (2015) を除くこれまでに紹介した温熱指標の観測研究の研究対象地域よりも空間スケールが一桁小さく、それゆえに、移流効果や雲量の違いによる気温・暑熱環境の違いが生じにくいという長所がある。また、河川が存在しないなどの地形の特性上、Nakayoshi et al. (2015) の研究対象地域である多治見市に比べても移流等の影響は小さいと期待できる。さらには、（緑化や街区再開発などの小規模な）適応策社会実装の効果の評価に資するという長所もある。そこで、本研究では、東京都渋谷区を対象に、土地利用や人間活動の違いが気温や温熱指標の非一様性の形成に及ぼす影響を観測によって明らかにし、その要因を考察する。

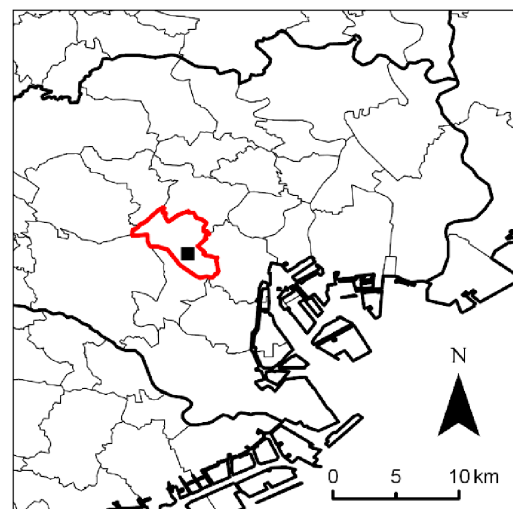


図1 東京都区部における渋谷区の位置（国土地理院、電子地形図から作成）

太実線が都県境界、細実線が市区境界、赤線内が渋谷区を意味する。黒四角は渋谷駅の場所を示している。





図2 平成23年度渋谷区における土地利用図（渋谷区2018）

## II 研究対象地域と観測方法

### 1. 研究対象地域

東京都渋谷区は、総面積が約 15.11 km<sup>2</sup>、人口が約 217,000 人（2014 年 12 月現在）の東京都の特別区である。本研究では、渋谷区内の商業地である渋谷駅周辺、住宅地である代々木上原、松濤、神山町、大規模緑地である代々木公園、住区基幹公園である宮下公園<sup>3)</sup>・美竹公園で観測を行った。以後本研究では、代々木公園を大規模緑地、住区基幹公園である宮下公園・美竹公園を小規模緑地と称することにする。

商業地である渋谷駅周辺は、平日休日・昼夜を問わず人々で賑わっており、車やバスなどの交通量も多い（図3(a)）。

住宅地の一つである代々木上原と松濤は、昼夜問わず比較的閑静な住宅地で、2～3階建ての戸建もしくは集合住宅が多い（図3(b)）。この二つの住宅地、とりわけ松濤はRC建物地区と言ってよく、山手線の東側に広がる木密住宅地とは大きく異なることに注意されたい。

代々木公園は、商業地や住宅地に囲まれた総面積 540,529 m<sup>2</sup>の大規模緑地であり、美竹公園は渋谷駅近

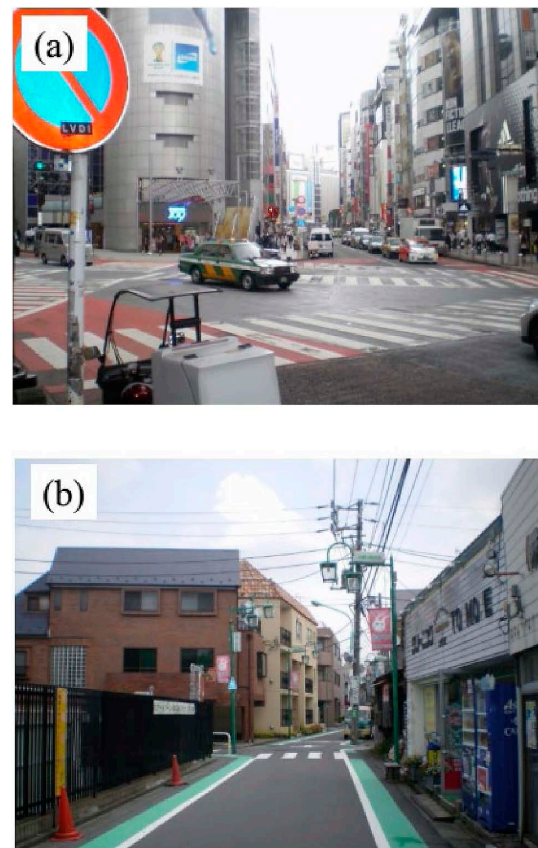


図3 観測地域内の様子

(a) 商業地の様子（渋谷駅前）、(b) 住宅地の様子（代々木上原住宅地）。

くの商業地内にある総面積1,029 m<sup>2</sup>の小規模緑地である。宮下公園は渋谷駅近くの商業地内にある総面積10,808 m<sup>2</sup>の小規模緑地である。

本研究は、土地利用や人間活動の違いが生み出す気温や温熱指標の非一様性を調査し、その要因を解明することを目的としている。そのため、観測場所は、ある特定の建物や樹木の影響を受けにくい風通しの良い日向で行うことにした。公園においても日向で行ったもう一つの理由は、後述するように夏季晴天日における公園の日向（人々が運動をする場所）の温熱環境に着目しているためである。

## 2. 定点観測

気温観測の手法には定点観測と移動観測の2種類ある。前者は長期間一定の場所で観測を行う手法で、その場所における時間変化を調査することができる。しかし、観測地点を多く設けなければならず、しばしば観測許可とコストの問題が発生し、小型で安価な（精度が劣る）測器を用いるなどの制限が課せられる。一方、後者は、少ない測器で多地点のデータを得ることができるという長所がある。しかし、観測値に時間変化に伴う誤差が含まれるという短所が発生する。本研究では、これらの観測手法の長短所を考慮して、両方の手法を併用した。

2014年8月3日18時から5日14時までの期間に、渋谷駅周辺の10地点、代々木上原の5地点、代々木公園<sup>4)</sup>の1地点、宮下公園の1地点、美竹公園の1地点で気温の定点観測を行った（図4）。使用した測器は、酒井ほか（2009）によって開発された自然通風型放射シェルターとT&D社製のロガー付きサーミスタ温度計（おんどとりRTR-52）である。設置高度は（法律上と安全上の理由により）2.5 mとして、測定間隔は20秒とした。自然通風型放射シェルターは、一般的に強制通風筒型放射シェルターに比べて高温バイアスを持つことが知られている。そこで、晴天弱風日に本観測で用いたシェルターの器差を調査したところ、0.1℃以下であった。この結果と、測器の設置場所を風通しのよい場所にしたことと、さらには、本観測は気温の絶対値よりも（土地利用毎の）気温差がより重要であることを考慮すると、本観測で用いた測器は解析上問題なく使えるレベルにあったと判断してもよいだろう。

地上気温観測とは別に、商業地内にある渋谷区立勤労福祉会館と大規模緑地内にある代々木オリンピックセンターで気温の鉛直分布観測を行った（図4）。渋谷区立勤労福祉会館では、9 m, 18 m, 33 mの高度に、代々木オリンピックセンターでは1.5 m, 6 m, 9 m, 21 mの高度に地上気象観測と同じ測器を設置した。観測期間は8月3日20時30分から翌日6時までである。

さらには、渋谷駅近くの商業地である神南1丁目と大規模緑地である代々木公園において、アスマン型通風乾湿計（吉野計器社製SY-8型）とおんどとりを内蔵した黒球（京都電子工業株式会社製）を用いたWBGTの測定を行った（図4）。このとき使用した黒球は、WBGT計測の際に定められている直径15 cmのVernon式黒球のものより直径が小さい直径7.5 cmのものである。そのため、WBGTは厳密には推定値となる。そこで、本研究では、以下の式(1)で示される補正式を用いて黒球の大きさの違いによって生じる誤差の補正を行った。

$$T_g = \frac{T_{7.5} - 0.17T_a}{0.83} \quad (1)$$

ここで、 $T_g$ は補正後の黒球温度（℃）、 $T_a$ は気温、 $T_{7.5}$ は直径7.5（cm）の黒球で観測された黒球温度（℃）である。晴天日に実施した事前の実験で直径15 cmの黒球と直径7.5 cmの黒球で同時に観測を行い、式(1)による補正を行った。両者の黒球温度を比較したところ、相関係数は0.996であり、十分に補正できていることを確認している。

また、渋谷駅から約2 km離れた住宅地に位置する筑波大学附属駒場高等学校（以後、筑波大附属駒場）の校庭で正味放射量と風向風速の定点観測を行った。このとき、地表面はダスト舗装であった。正味放射量の測定にはREBS社製のQ7を、風向風速の測定にはYOUNG社製の3杯式風速計と矢羽根式風向計の組み合わせ（CYG-3002）を用いた。どの測器も測定高度は1.5 mとした。

## 3. 移動観測

定点観測とは別に、徒歩による気温の移動観測を8月3日20時30分から21時30分、8月4日4時30分から5時30分、13時から14時、20時30分から21時30分、8月5日4時30分から5時30分、13時から14時の計6回



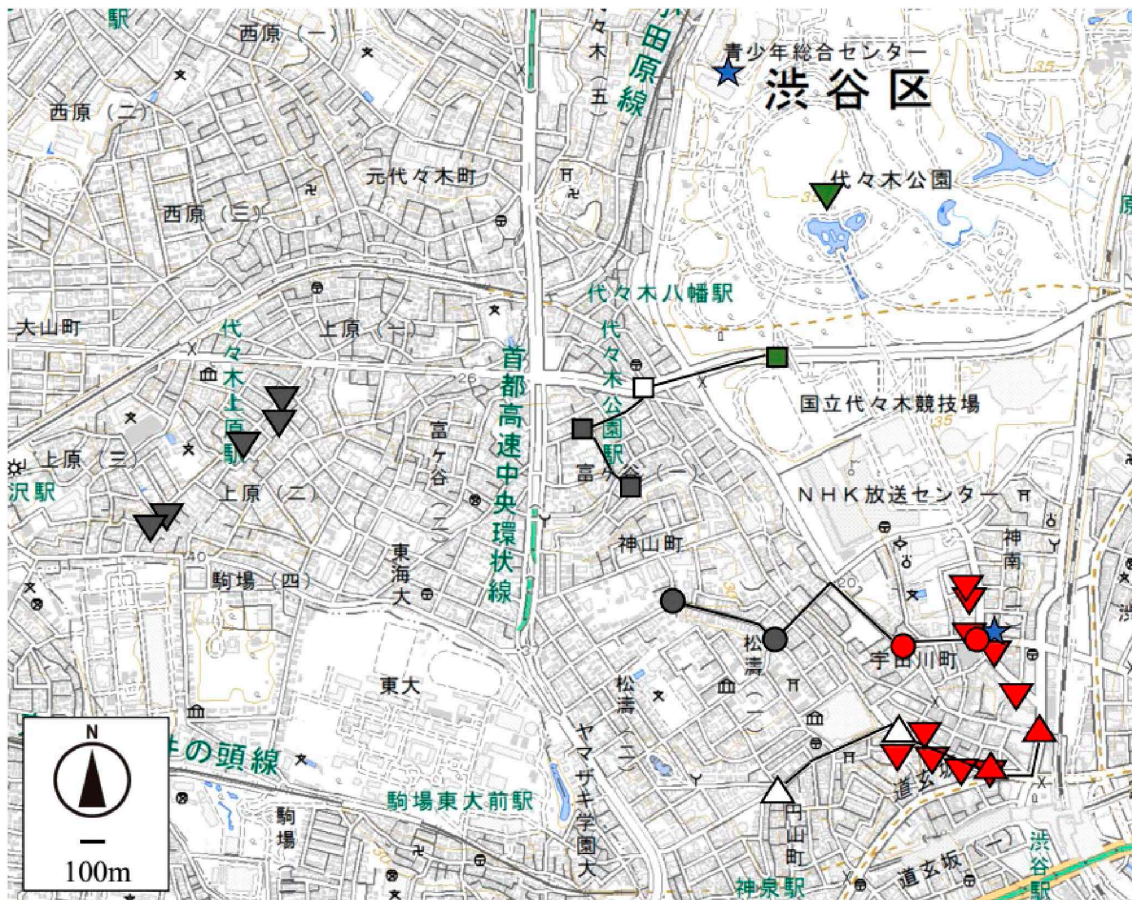


図4 気温の観測地点マップ

逆三角は地上気温の定点観測地点。青色の星は気温の鉛直観測地点。四角，丸，三角はそれぞれ移動観測の際の代々木ルート，公園通ルート，道玄坂ルート。赤色，灰色，緑色はそれぞれ商業地，住宅地，緑地での観測地点。白は土地利用が混在している観測地点。WBGTの観測は代々木公園内の気温の定点観測地点と神南一丁目の一番北側に位置する地上気温の定点観測地点付近で実施した。

(国土地理院，電子地形図に加筆して作成)。

行った。観測ルートは土地利用に着目し，代々木ルート，公園通ルート，道玄坂ルートの3ルートを設定した(図4)。いずれのルートも片道約0.6から0.9 kmであり，ルート上にそれぞれ4カ所の観測地点を設定した。

移動観測地点ではアスマン型通風乾湿計(吉野計器社製SY-8型)を用いて地上1.5 mの高さの気温を測定し記録した。これらのルートとは別に，渋谷駅周辺，松濤，代々木公園において，5時30分から6時30分，14時30分から15時30分，20時30分から21時30分に赤外線サーモグラフィ装置カメラ(NEC Avio社製TH9100)を用いた熱画像の撮影を行った。3つのルートの概要を紹介する。

代々木ルートは，代々木公園中央部を走る井の頭通

りにある代々木公園球技場入口からスタートし富ヶ谷の住宅地へと入っていく全長0.86 kmで，片道約16分のルートである。井の頭通りは交通量が多い大きな幹線道路の一つである。富ヶ谷の住宅地は交通量の少ない住宅地である。1番目の観測地点は代々木公園で，2番目は商業地と住宅地の境界付近，3番目と4番目の観測地点は富ヶ谷の住宅地である。

公園通ルートは，勤労福祉会館前交差点から西方向にある下り坂を下り，神南小学校下交差点を右，NHKセンター下交差点を左に曲がり神山町の住宅地へ進む全長約0.89 km，片道約16分のルートである。NHKセンター下交差点までは人通りも多く，交通量も多い商業地である。しかし，その先に進むほど人が少なくなり，途中から住宅地に入る。1番目と2番目の観測地

点は商業地であり、3番目と4番目は住宅地である。

道玄坂ルートは、神南1丁目交差点から渋谷駅前スクランブル交差点、道玄坂下交差点へと進む。右方向の道玄坂2丁目交差点方向に進み松濤郵便局前交差点を超える全長0.63 km、片道約11分のルートである。1番目と2番目の観測地点は商業地であり、3番目と4番目は商業地と住宅地の境界付近である。

以後の解析では、土地利用との関係を明確にするため、商業地と住宅地と大規模緑地のデータのみ利用し、異なる土地利用間の境界付近のデータは割愛する。

#### 4. 数値実験

本研究では、商業地、住宅地、草地間での気温の日変化の違いに及ぼす土地利用の影響（緑被率、建物効果）と人間活動の影響（人工排熱効果）の大きさを個別に評価するため、Doan and Kusaka (2019) で開発された多層都市キャノピーモデルを用いる。一般的に、多層都市キャノピーモデルの基礎方程式は、式(2)のように鉛直1次元の拡散方程式に地衡風の影響を加味したものであり、物理過程として、乱流拡散係数の式と、キャノピー空間内での3次元放射の式、建物表面・道路路面での熱収支式が加わる（例えば、Kondo et al. 2005; Ikeda and Kusaka 2010）。

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + f(v - v_g) - c_d A u (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m m \frac{\partial v}{\partial z} \right) - f(u - u_g) - c_d A v (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial z} \left( K_h m \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{Q_{AS}}{\rho c_p} \\ \frac{\partial q_v}{\partial t} &= \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial z} \left( K_q m \frac{\partial q_v}{\partial z} \right) + \frac{Q_{AL}}{\rho l}\end{aligned}\quad (2)$$

ここで、基礎方程式中の  $u, v, \theta, q_v$  は、それぞれ、風の東西成分、風の南北成分、温位、水蒸気混合比であり、いずれも予報変数である。 $f, u_g, v_g$  はそれぞれコリオリパラメータ、地衡風の東西成分、地衡風の南北成分であり、 $\rho, c_p, l$  はそれぞれ空気密度と定圧比熱と水の蒸発潜熱である。これらはモデルのパラメータもしくは定数として与えられる。 $K_m, K_h, K_q$  はそれぞれ運動量・熱・水蒸気に対する拡散係数であり、Mellor and

Yamada (1974) によって開発された乱流クロージャーモデルのレベル2によって計算される。 $Q_{AS}$  と  $Q_{AL}$  は熱と水蒸気のシンク・ソース項であり、非断熱加熱量等から計算される。ただし、本実験では、晴天日を対象としているためニュートン冷却で表現する放射冷却の効果のみとなる。 $c_d, A, m$  は、それぞれ建物の抵抗係数と建物の面積体積率とモデルのコントロールボリュームに対する建物占有率であり、パラメータとして与えられるか内部パラメータとして計算される。

多層キャノピーモデルの下部境界条件は、熱フラックス・水蒸気フラックス・運動量フラックスで与えられる。これらの値は、建物表面や道路面等に入射される短波放射・長波放射と地上風・温度・水蒸気混合比を入力値として地表面熱収支式の結果とモニン-オブコフの相似則から計算される。建物表面や道路面等に入射される放射は、建物の3次元効果（天空率の効果等）を考慮してレイ・トレーシング法によって計算される。レイ・トレーシング法は室内照明分野等で利用されている有名な手法（アルゴリズム）であるが、詳細について興味のある読者はDoan and Kusaka (2019) を参照されたい。

多層都市キャノピーモデルでは、ある地域の平均的な大気の状態を初期値として、その地域の建物高さ、建坪率、建物や道路の物性値、緑被率、人工排熱などの平均値をパラメータとして与えることで、大気境界層内の気温や湿度、風の鉛直分布などが計算される。建物解像LESモデルなどに比べてシンプルなモデルであるが、その分、結果の解釈がしやすいという長所もある。

#### 5. 数値実験の概要

本研究では、商業地、住宅地、草地間での気温の日変化の違いに及ぼす土地利用の影響（緑被率、建物効果）と人間活動の影響（人工排熱効果）の大きさを個別に評価するため、パラメータの異なる4種類の都市に関する数値実験と、草地を想定した数値実験を実施した（表1）。これらの値は既存研究を参考にして設定した（例えば、Kondo et al. 2005; Ohashi et al. 2007; Ikeda and Kusaka 2010; Kusaka et al. 2012）。

実験1と実験2は、それぞれ、住宅地、商業地を仮定した実験である。土地利用と人間活動の影響を反映



表1 本研究で行った実験の都市パラメータ

実験	建物高さ (m)	熱伝導率 (W/m・K)	建物熱容量 (J/m <sup>3</sup> ・K)	人工排熱最大値 (W/m <sup>2</sup> )	緑被率 (%)
1	7.5	1.0	$1.0 \times 10^6$	30.0	10
2	31.5	1.5	$2.1 \times 10^6$	120.0	5
3	31.5	1.5	$2.1 \times 10^6$	30.0	5
4	7.5	1.0	$1.0 \times 10^6$	120.0	5

させるため、観測地点周辺におけるそれぞれの土地利用での代表的な建物高さ（商業地で31.5 m、住宅地で7.5 m）や熱慣性を考慮して統計資料から設定した（渋谷区 2018）。緑被率（商業地で5%、住宅地で10%）や人工排熱（商業地で約20～120 W/m<sup>2</sup>、住宅地で約5～30 W/m<sup>2</sup>）については、先行研究における東京の商業地や住宅地の値を参考に設定した（例えば、Kondo et al. 2005; Kikegawa et al. 2014; Kusaka et al. 2012; Kusaka et al. 2016）。実験3、実験4は、建物影響を評価するため、それぞれ人工排熱と建物影響（建物高さと熱慣性）を変化させた実験である。なお、これらとは別に、草地を想定して、建物と人工排熱をなくし緑被率を100%にした草地実験も実施する。計算初期時刻は8月1日午前0時で、4日間の計算を行い、4日目の結果を解析に用いた。地上気温と地上相対湿度の初期値は大手町の気象台を参考にしてそれぞれ28.4℃と80%（理想的に設定、地上で約80%、1500 mまで線形に減少）に設定した。温位傾度の初期値は夏季の典型的な値である0.004℃/mに設定した。地衡風は、10 m/sの南西風とした。短波・長波放射は晴天を仮定してKusaka and Kimura (2004) と同じ方法で計算した。下部境界条件は先述のように計算されたフラックスを与えた。上部境界条件は、運動量は地衡風の風速に固定し、温度・水蒸気混合比については初期値に固定した。

### III 観測結果

#### 1. 観測期間中の気象概要

観測期間中（2014年8月3日から2014年8月5日）は、台風の影響により西日本は雨天となったが、東日本は高気圧に覆われおおむね晴天であった（図5、図6(a)）。

大手町の気象台で観測された8月3日の日最高気温は35.5℃であり、日最低気温は27.9℃であった。8月4日の日最高気温は34.7℃、日最低気温は27.8℃、8月

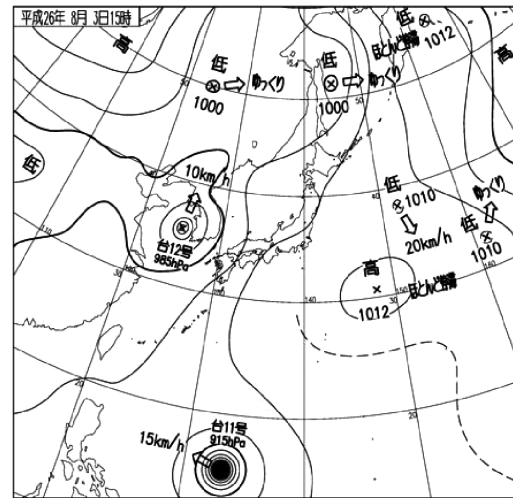


図5 2014年8月3日15時の気象庁の天気図

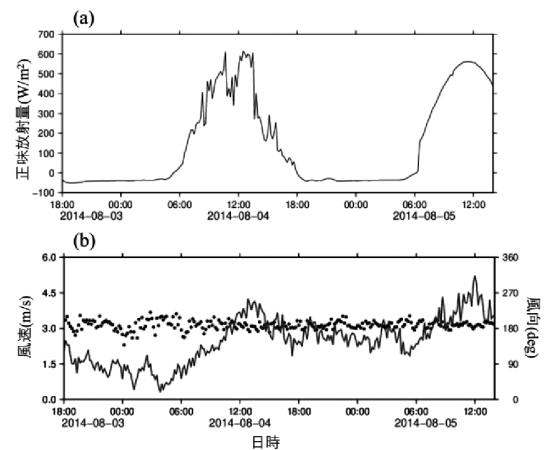


図6 筑波大附属駒場での観測結果  
(a) 正味放射量, (b) 風向・風速。  
点線は風向、実線は風速を意味する。

5日の日最高気温は36.1℃であった。観測期間中に筑波大学附属駒場高等学校の校庭で測定された風向・風速は、図6(b)に示すようにおおむね0から5 m/s程度の南風であった。8月3日から4日にかけては日中に大きく夜間に小さくなるという一般的な日変化を示しているが、8月4日から5日の夜間の風速は3 m/s前後とやや大きかった。

#### 2. 気温の定点観測の結果

はじめに、渋谷駅前の商業地、代々木上原の住宅地、商業地内の2つの緑地、大規模緑地（代々木公園）において実施した定点観測の結果から、土地利用の違いによって生じる気温の日変化の違いを述べる。図7は、

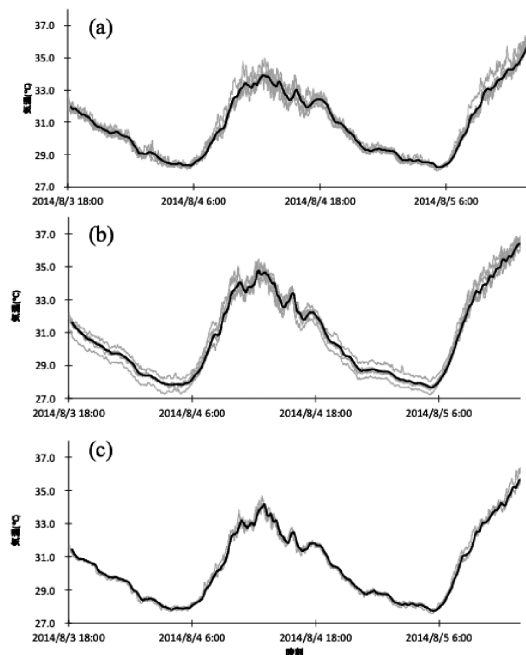


図7 観測した気温の20分移動平均値

(a) 渋谷駅前の商業地 (10地点), (b) 代々木上原の住宅地 (5地点), (c) 商業地内の小規模緑地 (2地点). 薄い灰色の実線が個々の定点観測地点の結果で, 太い黒色の実線が地点平均値.

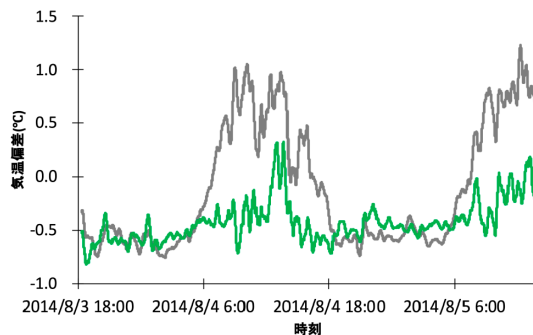


図8 商業地の気温からの偏差の20分移動平均値

灰色線: 住宅地と商業地の差 (住宅地-商業地), 緑色線: 商業地内の小規模緑地と商業地の差 (商業地内の小規模緑地-商業地). いずれのグラフも図7で求めた地点平均値を用いて計算している.

商業地, 住宅地, 商業地内の小規模緑地で観測した気温であり, 図8は商業地の気温からの偏差である. 図には, 同一地域でのアンサンブル平均 (地点平均) を施した結果もあわせて記載している. 時空間平均値で議論する理由は, 都市街区の気温は, 熱対流や, 乱流, 放射などの影響により時空間的な局所性が極めて高く, 瞬間値で土地利用との関係を議論するのは不適当だからである.

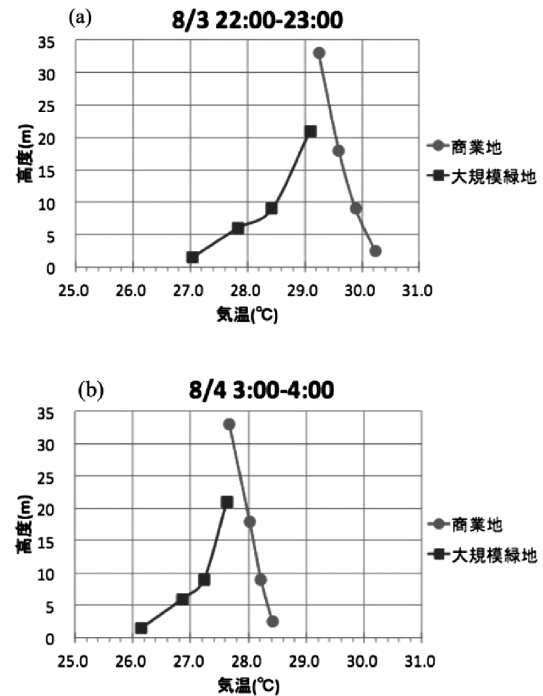


図9 商業地 (勤労福祉会館) および大規模緑地 (代々木オリンピックセンター) で測定した夜間の気温の鉛直分布

(a) 2014年8月3日22-23時の1時間平均値, (b) 2014年8月4日3-4時の1時間平均値.

らである. この図から, 日中は住宅地で最も気温が高く, 小規模緑地で最も気温が低いことがわかる. 8月4日の商業地, 住宅地, 小規模緑地における最高気温の20分平均値はそれぞれ33.9°C, 34.8°C, 34.2°Cであり, 住宅地で最も高く, 商業地と小規模緑地は測器の誤差を考慮すると同程度であることが分かる. 住宅地と商業地の差は0.9°Cである.

一方, 夜間の気温は, 商業地, 住宅地, 小規模緑地でそれぞれ28.3°C, 27.8°C, 27.8°Cであり, 商業地で最も高く, 住宅地と小規模緑地は同程度の値となっていることが分かる. 商業地の最低気温は住宅地よりも0.5°C高い. これらの結果は, 商業地の気温の日較差が住宅地や小規模緑地に比べて小さいことを示唆している. 都市街区内では, たとえ同じ土地利用内であっても, 街区内の複雑な風環境による熱の移流の違いや, 熱対流や大規模乱流による熱の拡散の違い, 建物の不均一性による放射収支の違い, 人工排熱の非一様性などによって, 気温差が生じるが, 図7からは (少なくとも本観測期間・場所においては) その効果は相対的



に小さいことが分かる。

図9は、商業地（勤労福祉会館）および大規模緑地（代々木オリンピックセンター）で測定した夜間の気温の鉛直分布である。この図を見ると、いずれの時間帯でも、大規模緑地では高度と共に気温が高くなる接逆転層が認められる一方で、商業地では、高度とともに気温が低くなっており、逆転層が認められないことが分かる。むしろ $0.98^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 以上の割合で高度と共に気温が低くなっており、少なくとも観測範囲内（地上から高度33 mまで）では絶対不安定になっていることに留意されたい。商業地と大規模緑地間での気温差は地上付近で最も大きく、その差は8月3日23時で $3.2^{\circ}\text{C}$ 、4日4時で $2.2^{\circ}\text{C}$ である。

### 3. 気温の移動観測の結果

気温の移動観測の結果を図10に示す。夜の結果を見ると、全体として、商業地の気温が最も高く、次に住宅地であり、最も低い場所が大規模緑地であることが分かる。早朝の結果は夜と似ているが、住宅地と大規模緑地の気温差は夜ほど大きくはない。一方、日中の結果は夜や早朝とは大きく異なる。

日中では、大規模緑地の気温が他に比べて明らかに低い。商業地と住宅地の気温は場所によって異なるが、平均すると住宅地の方がやや高い。商業地と住宅地の日中の気温差が定点観測ほど大きくならなかった理由の一つは、建築物・街区構造という点で、松濤（移動観測地点）の方が代々木上原（定点観測地点）よりも、商業地に近いためであると推察される。日中は住宅地、夜間は商業地で気温が最も高いという移動観測の結果は、定点観測の結果を支持するものであり、独立した測器と観測方法で類似の結果が得られた意味は大きい。

図11は、商業地（渋谷駅前）、住宅地（松濤）、大規模緑地（代々木公園）で撮影した日中の熱画像である。大規模緑地は商業地や住宅地に比べて、地表面温度が明らかに低い。芝生面、樹木とも約 $30^{\circ}\text{C}$ 前後である。商業地と住宅地の建物の表面温度はいずれも約 $34^{\circ}\text{C}$ から $40^{\circ}\text{C}$ 程度となっており大きな違いは見られない。これは、先に述べたように松濤地区がRC建物地区であるためだと推察される。しかし、実際には住宅地には木造住宅があるため全体としては住宅地の方が表面

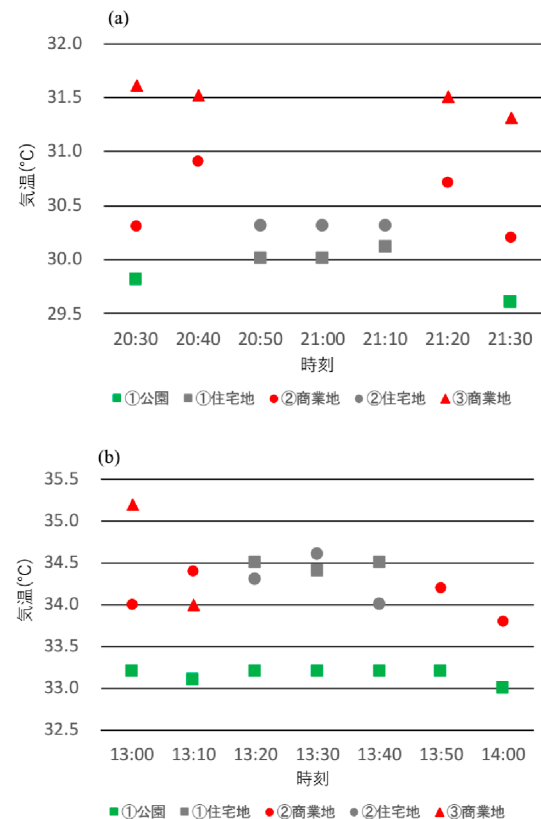


図10 気温の移動観測と定点観測の結果  
●が公園通ルート、▲が道玄坂ルート、●と▲の赤色は商業地、灰色は住宅地、灰色の■が代々木ルートの住宅地、緑色の■は代々木公園を意味する。(a) 2014年8月3日20:30から21:30の観測の結果、(b) 2014年8月4日13:00から14:00の観測の結果。移動観測の結果に時差補正は行っていない。

温度は高くなると推察される。道路路面温度に関しては住宅地の方が約 $10^{\circ}\text{C}$ 程度高いことがわかる。これは、路面の物性値の差や日射の差などによると推察される。

次に、夜間の熱画像を確認する（図12）。日中と同様に、大規模緑地の芝生は商業地や住宅地の道路に比べて表面温度が低く、その差は $5^{\circ}\text{C}$ 程度である。ただし、樹幹は芝生よりも $3^{\circ}\text{C}$ 程度高い。商業地と住宅地の道路路面温度はどちらも $33^{\circ}\text{C}$ 程度で、建物表面温度もどちらも $30^{\circ}\text{C}$ 程度である。ただし住宅地には木造住宅もあることから、全体的には住宅地の方が表面温度は低いと推察される。商業地・住宅地とも表面温度が気温よりは高いことから、この時間は正の顕熱フラックスであることが示唆される。

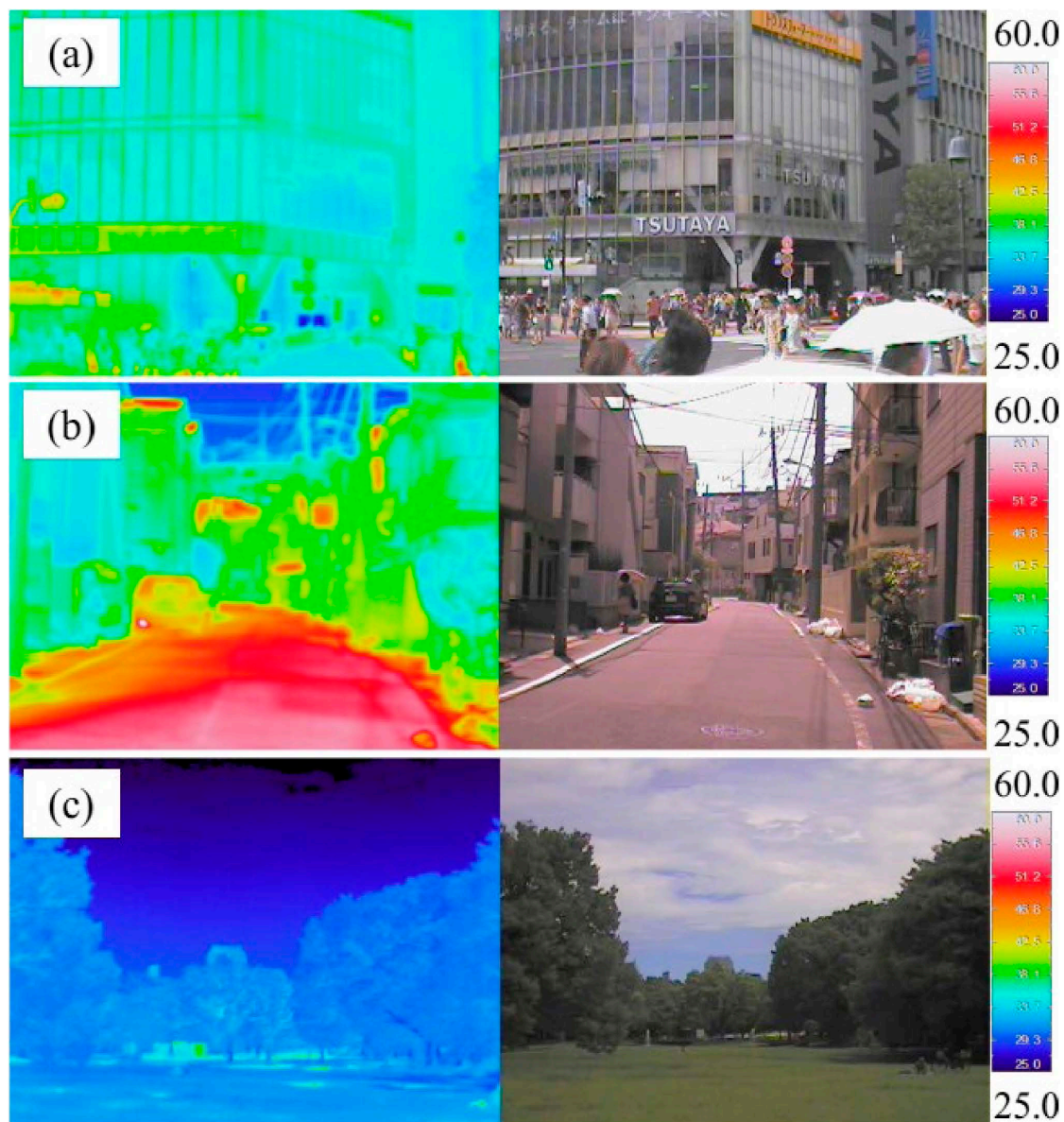


図11 (a) 商業地（渋谷駅前，13:40撮影），(b) 住宅地（松濤，13:25撮影），(c) 大規模緑地（代々木公園，13:10撮影）での熱画像

2014年8月4日の昼の結果．長目盛りは4.3°C毎．

#### 4. WBGTの観測結果

人々の感じる暑さは，気温だけでなく湿度，風，放射によっても変わる．いわゆる暑さ指数と呼ばれる湿球黒球温度（Wet-Bulb Globe Temperature, WBGT）は，これら全てを考慮した温熱環境指数の一つである．Yaglou and Minard（1957）で定義された式は以下の通りである．

$$\text{WBGT} = 0.7 \text{ Tw} + 0.2 \text{ Tg} + 0.1 \text{ T} \quad (3)^5$$

ここで，Twは湿球温度，Tgは黒球温度，Tは乾球温度（気温）である．

表2は，8月3日と4日の日中に商業地と大規模緑地（代々木公園）で観測したWBGTの結果をまとめたものである．この表から，WBGTの値は，商業地の方がやや高いが，平均で0.3°C程度であり，広く利用されている熱中症リスクレベルとして見た場合，いずれも嚴重警戒レベルである28°Cから31°C（日本気象学会 2013）となり，それほど大きな差ではないことが



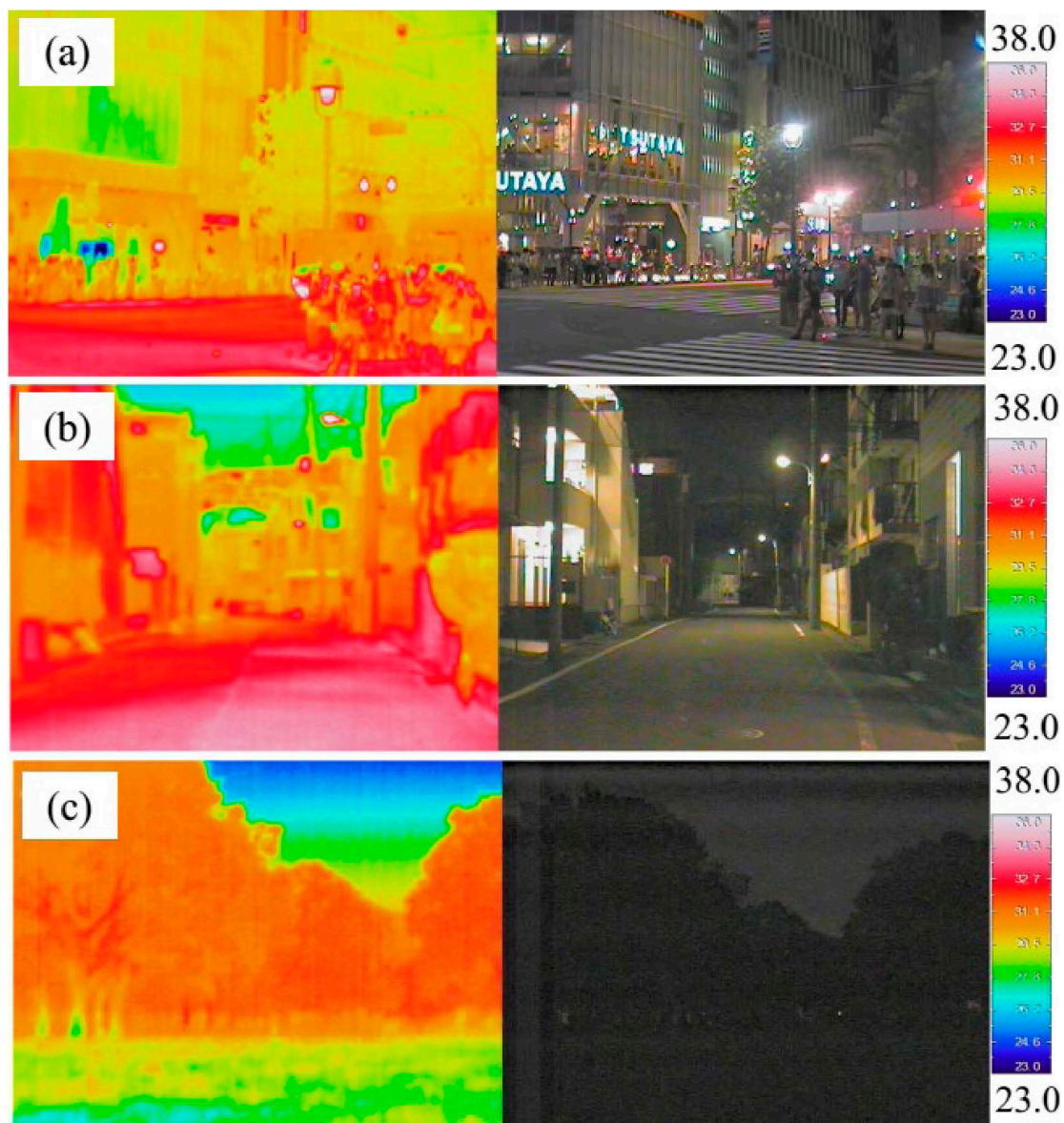


図12 (a) 商業地（渋谷駅前, 21:10撮影）、(b) 住宅地（松濤, 20:55撮影）、(c) 大規模緑地（代々木公園, 20:40撮影）での熱画像

2014年8月3日の夜の結果。長目盛りは1.6°C毎。

分かる。

気温の結果を見てみると、IIIの1.やIIIの2.で紹介した気温観測の結果と同様、この観測でも商業地の方が大規模緑地よりも気温が高くなっており、その差は1.8°Cもある。黒球温度の差はさらに大きく、商業地の方が大規模緑地よりも8.2°Cも高い値となっている。この理由として、以下の3つが考えられる。一つ目の理由は、商業地の道路面温度の方が大規模緑地の地表面温度よりも高いことである。商業地の黒球は地表面

からより強い赤外放射を受け取ることになる。二つ目の理由は、商業地の方が周囲の気温が高く、風がやや弱いためである。黒球とそれに近接する大気の間での乱流による熱交換が小さくなっていると考えられる。

最後に、湿球温度の結果を見る。湿球温度の結果は、気温や黒球温度とは逆で、商業地の方が大規模緑地よりも低くなっている。その差は、2.4°Cであり、一見すると黒球温度の差を埋めるほどではない。しかしながら、WBGTは式(3)の通り、湿球温度を重視する指



表2 商業地と大規模緑地で測定した乾球温度（気温）、湿球温度、黒球温度、およびWBGTの値

		8月3日		
		商業地	公園	差(商業地-公園)
乾球温度	Ave.	34.3	33.0	1.3
	Max.	35.0	33.7	1.3
	Min.	32.7	32.4	0.3
湿球温度	Ave.	23.4	26.0	-2.7
	Max.	24.1	26.9	-2.8
	Min.	22.8	25.2	-2.4
黒球温度	Ave.	50.0	38.0	11.9
	Max.	51.6	44.6	7.0
	Min.	47.0	34.4	12.6
WBGT	Ave.	29.8	29.1	0.6
	Max.	30.5	30.0	0.4
	Min.	28.7	28.2	0.6
		8月4日		
		商業地	公園	差(商業地-公園)
乾球温度	Ave.	33.5	31.2	2.3
	Max.	34.6	32.1	2.6
	Min.	32.5	30.3	2.2
湿球温度	Ave.	23.8	25.9	-2.0
	Max.	24.4	30.9	-6.5
	Min.	22.8	25.3	-2.5
黒球温度	Ave.	45.8	40.2	5.6
	Max.	49.1	42.7	6.4
	Min.	40.9	36.4	4.5
WBGT	Ave.	29.2	29.2	0.0
	Max.	29.9	29.9	0.0
	Min.	28.0	28.0	0.0

数であるため、湿球温度の差と気温、黒球温度の差がほぼキャンセルして、結果的に、商業地と大規模緑地のWBGTの差が0.3℃という小さな差になっている。気温で見ると、大規模緑地は商業地や住宅地よりも低くなるが、WBGTという温熱環境指数で見ると大きな違いがないことから、夏季晴天日の大規模緑地は、特にスポーツなどの日向での運動を伴う利用方法においては、人体にとって必ずしも有効な避暑地であるとは言えないだろう。

#### IV 考察

本研究で実施した観測によって、日中は、住宅地の方が商業地よりも気温が高いことが分かった。夜間はその逆で、商業地の方が住宅地よりも気温が高くなることが確認された。

はじめに、夜間の気温差について考察する。商業地と住宅地の夜間の気温差の主要因の一つとして、熱慣性の違いがあげられる。これは、住宅地よりも商業地の方が、気温の日較差が小さいという観測事実から推

察できる。観測に先立ち現地調査より目視で確認したところ、本観測を実施した渋谷の商業地と住宅地の建物の多くは、いずれもRC建物のようであり、住宅地には木造建物が相対的に多く存在していた。行政資料（渋谷区 2018）で確認したところ、渋谷駅周辺は主として鉄筋コンクリート造をはじめとする耐火造であり、代々木上原住宅地は主として木造部分を含む防火造であった。このような構造物の違いにより、住宅地の方が商業地よりも熱容量はやや小さくなると言えよう。さらには、同行政資料によれば住宅地の建物高さは商業地の建物に比べて相対的に低いため、街区全体の表面積や建物体積は小さくなる。同時に天空率も低くなる。これらの複合的な建物効果の結果として、日中の気温は住宅地で高く、夜間の気温は商業地で高くなると考えられる。

人工排熱の違いは夜間の気温差の主要因の一つになっていると考えられる。仮に、商業地と住宅地の夜間の気温差が熱慣性のみでほぼ説明できるのであれば、理論的に両者の気温差は早朝に最大となるはずである。一方、人工排熱の影響は、人間活動がより活発な日没数時間後の方が早朝よりも大きくなる。商業地と住宅地の気温差が日没数時間後に最大となる今回の観測結果は、人工排熱の効果を無視できないことを意味している。人工排熱の効果は、商業地で観測した気温の鉛直分布からも支持される。商業地の気温の鉛直分布は、夜間絶対不安定になっていた。水の相変化がない状態で地面付近の大気が絶対不安定になるためには、地面付近から大気への加熱が基本的には必要である。人工排熱は終日存在するので、昼夜を問わず気温を上昇させるが、多くの先行研究で商業地の方が住宅地よりも大きなことが確認されている（例えば、Ichinose et al. 1999; Kikegawa et al. 2014; Kusaka et al. 2016）。

人工排熱と建物効果のいずれがより支配的な要因であるかは、観測データのみから判断することは不可能である。この問いに答えるためには、高精度な数値シミュレーションモデルによる感度実験が必要だろう。

そこで、本研究では多層都市キャノピーモデルを用いた数値実験を実施した。計算設定は、IIの4.の通りである。実験1（以後、住宅地実験）と実験2（以後、商業地実験）と草地実験という3つの基準実験の結果を比較して見てみると、草地実験の結果は昼夜を問わ

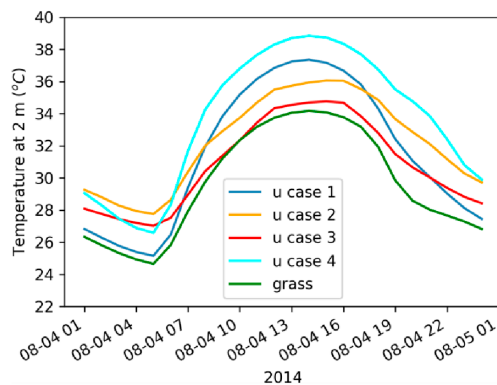


図13 各条件を課して行った数値実験によって得られた気温の時系列

各実線は凡例のように表1の実験と対応している。

ず気温が一番低く、住宅地実験と商業地実験ではおおよそ昼夜で気温が逆転している（図13）。そして、気温の日較差は、商業地実験の結果よりも住宅地実験の結果の方が小さくなっている。例えば、日最高気温が最も高いのは、住宅地実験の結果（37.4℃）であり、その次が商業地実験の結果（36.1℃）であり、最も低いのは草地実験の結果（34.2℃）となっている。一方で、日最低気温が最も高いのは、商業地実験の結果（27.8℃）であり、その次が住宅地実験の結果（25.1℃）であり、最も低いのは草地実験の結果（24.6℃）となっている。これらの結果は、本観測の結果から得られた基本的な特徴（図7～図10）と一致している。ただし、多層都市キャノピーモデルを単体で利用しているので、気温の値は正確には再現できていない。そこで、以下では、商業地の基準実験である商業地実験の結果とその対照実験（感度実験）である実験3と実験4の結果から得られる相対的な気温差（実験結果の大小比較）に重点を置いて考察する。以後実験3を排熱感度実験、実験4を建物感度実験と呼ぶ。

排熱感度実験の結果は、商業地実験の結果に比べて、日最高気温および日最低気温がそれぞれ1.3℃と0.8℃低くなっている。一方、建物感度実験の結果は、商業地実験の結果に比べて、日最高気温は2.7℃高くなっており日最低気温は1.2℃低くなっている。これらの結果は、商業地の大きな熱慣性は、商業地の日最高気温を低下させるが日最低気温を増加させること、大きな人工排熱は日最高・日最低気温とも増加させることを意味している。さらには、日中の大きな人工排熱で

は大きな熱慣性による気温低下をキャンセルできないこと、夜間の高温に対しては、人工排熱の効果よりも建物効果の方が大きいことも示唆している。これらの結果は人工排熱や熱慣性の推定値に依存するものの本観測結果から得られた考察をよく支持している。

天空率と建物群の熱慣性と分離して評価するのは難しい。天空率を大きく（小さく）するために建物高さを低く（高く）すると体積熱容量が減少し（増大し）全体の熱慣性も減少（増大）するからである。天空率の効果については、それだけで大きな研究となるため、今後の課題としたい。

次に、風に対する建物効力が生み出す機械乱流の効果、すなわち、乱流による接地逆転層の解消効果について議論したい。観測日は比較的風が強かったため、平均建物高さと同最大建物高さの両方とも大きな商業地の方が住宅地よりも機械乱流の効果が強かった可能性がある。ただし、次に記す理由により、これが商業地と住宅地の地上気温差の主要因になったとは考え難い。一つの理由は、夜間の地面付近の大気が中立ではなく絶対不安定になっていたことである。機械乱流による逆転層の破壊が支配要因であれば、地面付近の大気は基本的には中立になるはずである。ただし、これについては気温の鉛直分布の観測精度が不十分な場合は異なる結果（中立）になる可能性を否定できない。もう一つの理由は、建物の力学効果のみを考慮した（放射収支・熱収支を十分に考慮していない）多層キャノピーモデルを用いた数値実験では夜間の機械乱流の効果を大きく評価しているが（例えば、Uno et al. 1989）、建物が放射収支・熱収支に及ぼす影響を考慮している多層都市キャノピーモデルを用いた数値実験の結果では、夜間の機械乱流の効果は大気境界層下部（キャノピー層よりも上空）に限られ、地面付近は地表面からの加熱の影響の方が支配的だという結果となっていることである（Martilli 2002）。Martilli (2002) の結果は、モデルの性格上 Uno et al. (1989) よりも信頼性が高いと思われる。三つ目の理由は、夜間の大気境界層下部（キャノピー層よりも上空）の温位は、日中の名残の混合層や移流によっておおよそ決まるため、夜間に地面からの加熱がなければ、この水平スケールの場合、商業地と住宅地の間に大きな違いは生まれない。したがって、機械乱流の効果は、夜間における名残の混合

層下部（キャノピー層よりもやや上空）の温位差が大きな商業地と大規模緑地の間の地上気温差の主要にはなり得るが、名残の混合層下部の温位差が小さい商業地と住宅地の場合、機械乱流の効果の違いが両者の地上気温差の主要因になりづらい。これらの三つの理由により機械乱流の効果は限定的であると考えられるが、あくまで本観測と先行研究の数値実験の結果から推察されたものであり、明確な結論を出すためには、さらに高度な観測や数値実験が必要である。例えば、多大規模乱流の直接計算と解析が可能で、なおかつ放射収支・熱収支・移流も取り扱えるLESモデル（例えば、Raasch and Schrotter 2001; Ikeda et al. 2015; Matsuda et al. 2018）を用いた数値実験が必要であろう。

これまで、夜間の気温差について考察してきた。商業地と住宅地の日中の気温差は何が主要因であろうか？ 答えは、建物の違いであると考えられる。住宅地の相対的に小さな熱慣性は、住宅地の日中の気温を商業地よりも高めることができる。一方、人工排熱の違いは日中の気温差の主要因にはなっていないと考えられる。人工排熱が主要因であれば、日中も夜間と同様に、商業地の方が住宅地よりも気温が高くなるはずである。このことは、観測結果と数値実験の結果の両方から支持されている。緑被率の違いは、気温差の直接的な要因とはなっていないと考えられる。緑被率の違いの効果は、日射による蒸発・蒸散の効果が大きくなる日中に大きく現れる。しかしながら、日中は、緑被率の大きな住宅地の方が商業地よりも気温が高く観測された。この観測事実は、日中の気温差に対する緑被率の違いの効果の小ささを示唆している。

最後に、土地利用とWBGTの関係について言及する。商業地で観測されたWBGTの値は、大規模緑地に比べて平均で0.3°C程度高かった。ただし、この0.3°Cという値は、測定誤差範囲であり、また熱中症リスクレベルで見た場合、同じレベルとなり、それほど大きな意味はもたない点に注意されたい。商業地は大規模緑地に比べて、気温で1.8°C、黒球温度で8.2°Cも高かった。しかしながら、樹木の多い大規模緑地に比べて湿球温度が2.4°C低く、このため、WBGTとしては大きな差にならなかったと考えられる。

## V 結論

本研究は、商業地、住宅地、緑地という異なる土地利用を1 kmから2 kmの範囲内に有する東京都渋谷区を対象に、土地利用や人間活動の違いが気温とWBGTの非一様性の形成に及ぼす影響を観測によって明らかにした。

観測結果から、日中では、住宅地の気温が商業地に比べてやや高く、緑地が最も低いことが明らかとなった。夜間は、商業地の気温が最も高く、緑地が最も低かった。日中に住宅地の方が商業地よりも気温が高くなる傾向にあるというのは、一般的な感覚とは異なるが、本観測の結果は大橋ら（2009）による先行研究と一致しており、また、商業地の大きな熱慣性を考えると妥当であると思われる。

緑地では夜間に接地逆転層が認められる一方で、商業地では夜間に絶対不安定となっていた。熱画像観測は、昼夜を問わず、商業地と住宅地で同程度の表面温度であることを示した。これらの結果は、商業地の大きな表面積・建物体積・熱容量による大きな熱慣性と人工排熱が商業地の小さな日較差、とりわけ夜間の高温を生み出していることを示唆している。

WBGTの場合は、気温とは異なり、商業地と緑地で大きな差はなかった。これは、気温も黒球温度も商業地の方が緑地よりも高かったが、湿球温度に関しては緑地の方が高かったためである。

一般的に、大規模な公園は緑が多いため、暑熱環境としては都市街区よりも良いと思われる。しかしながら、本研究で実施した渋谷区での観測の結果は、そのような印象は必ずしも正しくないことを示唆している。近年、天気予報などで暑さ指数の予測に基づき判定された熱中症警戒レベルが予報されるようになってきた。嚴重警戒レベルの日は、たとえ公園であっても、日向にいる限り商業地と同程度に危険であることを意識するべきであろう。

## 謝 辞

本研究の一部は、文部科学省「気候変動適応技術社会実装プログラム（SI-CAT: Social Implementation Program on Climate Change Adaptation Technology）」の支援により実施された。また、本研究の一部は、共著者である



猪狩浩介の卒業研究と小久保礼子の修士研究として行われた。観測を行うにあたって、筑波大学附属駒場高等学校、渋谷区役所、渋谷区立勤労福祉会館、渋谷公園通商店街振興組合、渋谷道玄坂商店街復興組合、東急本店通商店街、上原仲通り商店街には観測場所を快くご提供していただきました。ここに感謝の意を表します。

## 注

- 1) 正式名称は、標準新有効温度 (Standard new Effective Temperature)。主として、人の温熱感の評価に対して用いられている温熱指標 (日本ヒートアイランド学会 2015)。建築工学分野で広く用いられている。気象要素のほかに、人の活動量や着衣量の影響も考慮して計算される。
- 2) 正式名称は、湿球黒球温度 (Wet-Bulb Globe Temperature)。主として、熱中症のリスクなど熱ストレスの評価に対して用いられている温熱指標 (日本ヒートアイランド学会 2015)。生気象学分野で広く用いられている。気象要素のみ考慮して計算される。WBGTの定義では、気温と湿球温度は通風筒や放射シェルターを用いずに測る。通風筒や放射シェルターを用いて観測した場合もWBGTと呼ぶことがあるが、区別して暑さ指数とも言うことも多い。
- 3) 現在、再開発中。
- 4) 代々木公園での観測は日中のみである。
- 5) この式には相対湿度や、風、放射の項がない。しかしながら、湿球温度には相対湿度の効果が含まれている。また、黒球温度には風と放射の効果が間接的に含まれている。この間接効果は、黒球温度の熱収支 (例えば、Okada and Kusaka 2013) から自明と言えるだろう。

## 文 献

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象マップの作成と気象の実態に関する研究——長野市全体を対象にして。日本建築学会計画系論文集 558: 63–70。  
大橋唯太・畔柳秀匡・亀卦川幸浩・岡 和孝 2009. 建物用途の異なる複数街区を対象としたヒートアイランド対策の数値シミュレーション。環境システム

研究論文集 37: 73–82。  
大橋唯太・亀卦川幸浩・山口和貴・井原智彦・岡 和孝 2010. 数値気象モデルを利用した屋外活動空間の暑熱評価。日本生気象学会誌 47(2): 91–106。  
岡田 牧・日下博幸・高木美彩・阿部紫織・高根雄也・富士友紀乃・永井 徹 2014. 夏季における岐阜県多治見市の気温分布調査。天気 61: 23–29。  
片山忠久・石井昭夫・西田 勝・林 徹夫・堤 純一郎・塩月義隆・北山広樹・高山和宏・大黒雅之 1990. 海岸都市における河川の暑熱緩和効果に関する調査研究。日本建築学会計画系論文報告集 418: 1–9。  
菊池 信・堀越哲美 2005. 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: 83–89。  
日下博幸・高根雄也・阿部紫織・高木美彩・重田祥範・大橋唯太・布和宝音 2012. 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。日本ヒートアイランド学会論文集 7: 1–9。  
近藤昭彦・三上岳彦・栗原昭子 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): 120–130。  
酒井 敏・梅谷和弘・飯澤 功・伊藤 文・小野耕作・矢島 新・鈴村尚起・森永修司 2009. 都市熱環境観測システムの開発研究。天気 56(5): 337–351。  
境田清隆・鈴木雅幸 1994. 密生した街路樹をもつ路上空間における晴天日の気温分布。地理学評論 67A(8): 506–517。  
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: 515–523。  
重田祥範・大橋唯太 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(6): 443–456。  
渋谷区 2018. 渋谷区の土地と建物。渋谷区HP. [https://www.city.shibuya.tokyo.jp/kankyo/toshi\\_keikaku/tochi\\_tatemono23.html](https://www.city.shibuya.tokyo.jp/kankyo/toshi_keikaku/tochi_tatemono23.html) (最終閲覧日: 2018年12月6日)  
菅原広史・成田健一・三上岳彦・本條 毅・石井康一郎 2006. 都市内緑地におけるクールアイランド強度の季節変化と気象条件への依存性。天気 53: 393–404。  
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。  
中川清隆 2011. 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: 255–284。  
中島 紅・高橋日出男・横山 仁・常松展亮 2018. 晴天弱風の夜間における東京都心の温位鉛直分布——東京タワーの気温観測値を用いた統計解析。地理学評論 91(1): 24–42。  
鍋島美奈子・古崎靖朗・中尾正喜・西岡真稔 2006. 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  
文集 1: 23–29.
- 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:  
403–420.
- 日本建築学会編 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.
- 日本ヒートアイランド学会編 2015. 『ヒートアイラン  
ドの事典——仕組みを知り, 対策を図る』 朝倉書  
店.
- 橋本 剛・堀越哲美 2003. 名古屋市近郊に位置する  
庄内川及び新川の海風の「風の道」としての働き.  
日本建築学会環境系論文 571: 55–62.
- 浜田 崇・三上岳彦 1994. 都市内緑地のクールアイ  
ランド現象——明治神宮・代々木公園を事例とし  
て. 地理学評論 67A: 518–529.
- 幡谷尚子・十二村佳樹・岩田達明・持田 灯・渡辺浩  
文・吉野 博・境田清隆 2007. 街路樹がストリー  
トキャニオン内の気流分布, 空気汚染, 歩行者空間  
の温熱快適性に及ぼす影響の検討——仙台市中心市  
街地の夏季の温熱・空気環境実測 (その1). 日本  
建築学会環境系論文 613: 95–102.
- 梅干野 晃 1981. リモートセンシングによる住宅地  
の熱環境の解析(I)——地上実測結果による考察と  
リモートセンシングデータの検討. 日本建築学会論  
文報告集 303: 69–78.
- 梅干野 晃・飯野秋成・古賀和博・佐野仁美 1995.  
サイドロッキング航空機MSSデータを用いた丘陵  
開発地域のヒートアイランドポテンシャルの計量及  
び土地被覆との関係の検討. 日本建築学会計画系論  
文集 60(471): 29–37.
- 本條 毅・高倉 直・水谷 敦 1998. 都市緑地が周  
囲に及ぼす影響の微気象観測. 農業気象 54: 323–328.
- 榊元慶子 2009. 大阪市域の夏季におけるヒートアイ  
ランド現象の時空間特性と暑熱指標 (WBGT) によ  
る評価. 大阪市立環境科学研究所報告 調査・研究  
年報 71: 35–40.
- 三上岳彦 2006. 都市ヒートアイランド研究の最新動  
向——東京の事例を中心に. E-Journal GEO 1(2):  
79–88.
- 三坂育正・成田健一 2012. 熱中症リスクから見た都  
心部の街路空間気温特性. 環境情報科学学術研究論  
文集 26: 231–236.
- 山田宏之 1994. 埼玉県幸手市における夏季の都市気  
温分布と緑地分布の関連についての解析. 造園雑誌  
57(5): 157–162.
- 横山 仁・安藤晴夫・山口隆子・市野美夏・秋山祐佳  
里・石井康一郎・三上岳彦 2005. 夏期における東  
京都区部のヒートアイランドの実態について: 2002  
年～2004年におけるMETROS観測結果. 東京都環  
境科学研究所年報 2005: 3–9.
- Doan, Q. V. and Kusaka, H. 2019. Development of a multi-  
layer urban canopy model combined with a ray tracing  
algorithm. *SOLA* 15, DOI: 10.2151/sola.2019-008 (in  
press)
- Ikeda, R. and Kusaka, H. 2010. Proposing the simplifica-  
tion of the multilayer urban canopy model: Intercompari-  
son study of four models. *Journal of Applied Meteorolo-  
gy and Climatology* 49: 902–919.
- Ichinose, T., Shinodozono, K. and Hanaki, K. 1999. Impact  
of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmo-  
spheric Environment* 33: 3897–3909.
- Ikeda, R., Kusaka, H., Iizuka, S. and Boku, T. 2015. Devel-  
opment of urban meteorological LES model for thermal  
environment at city scale. In *9th International Confer-  
ence for Urban Climate*, Toulouse, France.
- Kikegawa, Y., Tanaka, A., Ohashi, Y., Ihara, T. and Shigeta,  
Y. 2014. Observed and simulated sensitivities of sum-  
mertime urban surface air temperatures to anthropogenic  
heat in downtown areas of two Japanese major cities, To-  
kyo and Osaka. *Theoretical and Applied Climatology*  
117: 175–193.
- Kondo, H., Genchi, Y., Kikegawa, Y., Ohashi, Y., Yoshikado,  
H. and Komiyama, H. 2005. Development of a multi-lay-  
er urban canopy model for the analysis of energy con-  
sumption in a big city: Structure of the urban canopy  
model and its basic performance. *Boundary-Layer Mete-  
orology* 116: 395–421.
- Kusaka, H. 2008. Recent progress on urban climate in Ja-  
pan. *Geophysical Review of Japan* 81(5): 361–374.
- Kusaka, H. and Kimura, F. 2004. Thermal effects of urban  
canyon structure on the nocturnal heat island. *Journal of  
Applied Meteorology* 43: 1899–1910.
- Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y., and Kimura, F. 2001.  
A simple single-layer urban canopy model for atmo-  
spheric models: comparison with multi-layer and slab  
models. *Boundary-Layer Meteorology* 101: 329–358.
- Kusaka, H., Suzuki-Parker, A., Aoyagi, T., Adachi, S. A.  
and Yamagata, Y. 2016. Assessment of RCM and urban  
scenarios uncertainties in the climate projections for August  
in the 2050s in Tokyo. *Climatic Change* 137: 427–438.
- Kusaka, H., Chen, F., Tewari, M., Dudhia, J., Gill, D. O.,  
Duda, M. G., Wang, W. and Miya, Y. 2012. Numerical  
simulation of urban heat island effect by the WRF model  
with 4-km grid increment: An inter-comparison study be-  
tween the urban canopy model and slab model. *Journal  
of Meteorological Society of Japan* 90B: 33–45.
- Leconte, F., Bouyer, J., Claverie, R. and Petrisans, M.  
2015. Using local climate zone scheme for UHI assess-  
ment: evaluation of the method using mobile measure-  
ments. *Building and Environment* 83: 39–49.
- Martilli, A. 2002. Numerical study of urban impact on  
boundary layer structure: sensitivity to wind speed, urban  
morphology, and rural soil moisture. *Journal of Applied  
Meteorology* 41: 1247–1266.
- Matsuda, K., Onishi, R. and Takahashi, K. 2018. Tree-  
crown-resolving large-eddy simulation coupled with

- three-dimensional radiative transfer model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 173: 53–66.
- Mellor, G. L. and Yamada, T. 1974. A Hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *Journal of Atmospheric Sciences* 31: 1791–1806
- Nakayoshi, M., Kanda, M., Shi, R. and de Dear, R. 2015. Outdoor thermal physiology along human pathways: A study using a wearable measurement system. *International Journal of Biometeorology* 59: 503–515.
- Ohashi, Y., Kikegawa, Y., Ihara, T. and Sugiyama, N. 2014. Numerical simulations of outdoor heat stress index and heat disorder risk in the 23 wards of Tokyo. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 53: 583–597.
- Ohashi, Y., Genchi, Y., Kondo, H., Kikegawa, Y., Yoshikado, H. and Hirano, Y. 2007. Influence of air-conditioning waste heat on air temperature in Tokyo during summer: Numerical experiments using an urban canopy model coupled with a building energy model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 46: 66–81.
- Okada, M. and Kusaka, H. 2013. Proposal of a new equation to estimate globe temperature in an urban park environment. *Journal of Agricultural Meteorology* 69(1): 23–32.
- Raasch, S. and Schroter, M. 2001. PALM—A large-eddy simulation model performing on massively parallel computers. *Meteorologische Zeitschrift* 10(5): 363–372.
- Stewart, I. D. and Oke, T. R. 2012. Local climate zones for urban temperature studies. *BAMS* December: 1879–1900.
- Stewart, I. D., Oke, T. R. and Scott Krayenhoff, E. 2014. Evaluation of the ‘local climate zone’ scheme using temperature observations and model simulations. *International Journal of Climatology* 34: 1062–1080.
- Tsunematsu, N., Yokoyama, H., Honjo, T., Ichihashi, A., Ando, H. and Shigyo, N. 2016. Relationship between land use variations and spatiotemporal changes in amounts of thermal infrared energy emitted from urban surfaces in downtown Tokyo on hot summer days. *Urban Climate* 17: 67–79.
- Uno, I., Ueda, H. and Wakamatsu, S. 1989. Numerical modeling of the nocturnal urban boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology* 49: 77–98.
- Yaglou, C. P. and Minard, C. D. 1957. Control of heat casualties at military training. *American Medical Association Archives of Industrial Health* 16: 302–316.

〈著者略歴〉



日下 博幸 (くさか ひろゆき)

筑波大学計算科学研究センター教授。1997年筑波大学大学院修士課程修了。博士(理学)。専門は気候学・気象学、特に小気候学。主な著書は「見えない大気を見る—身近な天気から未来の気候まで」(くもん出版), 「日本気候百科」(丸善出版), 「学んでみると気候学は面白い」(ベレ出版)。 <http://www.geoenv.tsukuba.ac.jp/~kusakaken/>

猪狩 浩介 (いがり こうすけ)

2015年筑波大学大学院生命環境科学研究科入学。2017年同大学院修士課程修了。現在パシフィックコンサルタンツ株式会社。



小久保 礼子 (こくほ れいこ)

2014年筑波大学大学院生命環境科学研究科入学。2016年同大学院修士課程修了。現在株式会社電通。

佐藤 拓人 (さとう たくと)

2016年筑波大学生命環境学群地球学類卒。同年同大学院生命環境科学研究科入学。2018年同大学院博士前期課程修了。修士(理学)。同年同大学院博士後期課程入学。

DOAN Quang Van (ドアン グアン ヴァン)

2012年筑波大学大学院生命環境科学研究科入学。2016年同大学院博士課程修了。博士(理学)。現在 The Centre for Climate Research Singapore (a research division of the Meteorological Service Singapore)。