

## 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—

## Effects of large green park on urban atmospheric cooling during nighttime — Meteorological observations around the Osaka Castle Park —

重田祥範<sup>1</sup>, 高岡利行<sup>2</sup>, 大橋唯太<sup>3</sup>, 亀卦川幸浩<sup>4</sup>, 平野勇二郎<sup>5</sup>

Yoshinori Shigeta<sup>1</sup>, Toshiyuki Takaoka<sup>2</sup>, Yukitaka Ohashi<sup>3</sup>, Yukihiro Kikegawa<sup>4</sup>, Yujiro Hirano<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 立正大学地球環境科学部環境システム学科

<sup>1</sup> *Department of Environment Systems, Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University*

<sup>2</sup> 岡山理科大学総合情報学部生物地球システム学科

<sup>2</sup> *Department of Biosphere-Geosphere System Science, Faculty of Informatics, Okayama University of Science*

<sup>3</sup> 岡山理科大学生物地球学部生物地球学科

<sup>3</sup> *Department of Biosphere-Geosphere Science, Faculty of Biosphere-Geosphere Science, Okayama University of Science*

<sup>4</sup> 明星大学理工学部総合理工学科

<sup>4</sup> *Department of Interdisciplinary Science and Engineering, School of Science and Engineering, Meisei University*

<sup>5</sup> 独立行政法人国立環境研究所社会環境システム研究センター

<sup>5</sup> *Center for Social and Environmental Systems Research, National Institute for Environmental Studies*

(受付 2012 年 4 月 9 日 / 受理 2013 年 1 月 8 日)

都市内緑地の大気冷却効果を定量的に把握するため、大阪城公園とその周辺都市部を対象とした地上気象観測を 2007 年 8 月 1~15 日にかけて連続的に実施した。その結果、大阪城公園のクールアイランド強度は、午前 4~5 時のあいだに +2.0°C 以上 (最大 +2.8°C) を示した。観測を実施した夜間には、この地域特有の南西寄りの一般風が卓越していたにもかかわらず、公園南側では一般風とは相反する弱い北風 (0.5m/s) が観測され、にじみ出し現象の存在を示唆する結果となった。また、冷気は公園東縁から都市部に流出しており、その影響範囲は最大で約 250m 認められた。冷気の生成場所を特定するため空間開放度の違いによる夜間の大気冷却量に着目し、公園内の芝生地と樹林地の気温差を検討した。その結果、放射冷却によって芝生地で生成された冷気が樹林地まで輸送されるよりも、樹林地の樹冠上部で生成された冷気が地表付近へと沈降し蓄積した可能性が示唆された。

キーワード : 都市気候, クールアイランド, 緑地公園, 天空率, 緑被率, 大気冷却量

The cool-island phenomena were observed at Osaka Castle Park on August 1-15, 2007. The surface-air temperature inside the park was nocturnally lower than that around urban areas. The cool-island intensity was more than + 2.0°C during 4 - 5 JST. The cooler air generated inside the park extended downwind at the distance of about 250 m. Next, we compared the atmospheric cooling amounts on the forest area with that on the lawn area. As a result, it was suggested that the cooler air over the forest canopy subsided into and accumulated on the ground surface.

Key words : urban climate, cool island, green park, sky view factor, green coverage, nocturnal cooling

## 1. 緒言

都市部での人工排熱やアスファルト・コンクリート被覆の増加は蓄熱効能を増大させ、都市高温化現象を促進している(森山, 2004; 三上, 2006)。そのため、都市部と郊外の気温差は拡大し、いわゆるヒートアイランドが形成され、熱中症や睡眠障害といった健康被害が生じる(井原・玄地, 2006)。この生活環境の改善には気温上昇の要因を取り除く必要があるが、人間活動や都市構造を変えることは容易ではない。そこで考えられた対策の一つが、都市の利便性を残しつつ、気温上昇を緩和させる緑地の導入である。この緑地を利用したヒートアイランド対策は、2004年3月のヒートアイランド対策関係府省連絡会議においても大きく取り上げられている。その中で、地表面被覆の改善として2007年度までに都市域における水と緑の公的空間量を約1割増加させることが閣議決定された(環境省, 2004)。

日中の緑地は、植物による蒸散効果によって都市部よりも気温上昇が緩やかである。一方、夜間の緑地はアスファルトやコンクリートで覆われている都市部よりも蓄熱が少ないため気温が低下しやすい(森山, 2004)。これらの作用によって、緑地では一日を通して都市部よりも低温な環境が形成されやすく、「クールアイランド」として従来から様々な視点で研究がおこなわれてきた(たとえば、丸田, 1972; 山田, 1995; 神田ほか, 1997; 本條ほか, 1998, 菅原ほか, 2006; 東海林ほか, 2010)。その中で、丸田(1972)は、日中の気温分布に着目したうえで、緑地で生成された冷気の影響範囲とその冷却効果は、風向・風速など気象状態に大きく依存することを指摘している。一方、夜間においては、クールアイランドの発生と同時に、緑地内で生成された冷気が緑地から周辺都市部へと向かって放射状に吹き出す現象も報告されている(丸田, 1972; Eliasson.I and Upmanis.H, 2000)。この現象は緑地と都市部の気温(気圧)差に起因した重力流的な冷気流出であり、「にじみ出し現象(Park breeze)」と呼ばれる(丸田, 1972)。対して、日中は夜間よりも一般風の影響が強く、重力流的な流出よりも移流によって風下側の都市部へ冷気が輸送されやすい。したがって、この重力流によるにじみ出し現象は、日中にみられ

る冷気流出のメカニズム(移流効果)とは異なる性質をもつ。そこで、本研究では議論の混同を避けるため、夜間に発生する重力流的な冷気流出を「にじみ出し現象」として扱うことにする。

にじみ出し現象の存在は1970年代から予測されていたが、その風速は0.1~0.3m/sと小さく、定量的な議論が困難であった。その中で、Honjo et al. (2003)や成田ほか(2004)は、新宿御苑周縁に4台の超音波風速計を設置し、緑地から放射状に吹き出すにじみ出し現象を定量的にも捉えることに成功している。ここでは、にじみ出し現象の発生時にはクールアイランド強度は大きくなるものの、その冷気の影響範囲はほとんど変化しないことも報告されている。竹林・森山(2005)は、大阪市内にある大阪城公園内の西の丸庭園に超音波風速計を設置し、気象観測をおこなっている。その結果、大阪城公園でも前述の新宿御苑と同様に公園内から都市部へ向けて放射状に流出するにじみ出し現象が夜間に確認されている。

このように、近年では緑地がもたらす大気冷却効果が注目されているが、冷気の流出を観測したものは前述の研究くらいであり、そう多くはない。さらに、既往研究の多くは数日程度の事例をもとに考察した報告が多く、特に夜間における都市と緑地の温度差について注目されてきたのが現状である。そのため、緑地を利用したヒートアイランド対策を検討するには十分な知見が得られているとは言い難く、更なる研究の蓄積が必要である。

そこで、本研究では未だ解明されていない大阪城公園の日中のクールアイランド強度と、夜間における冷気の影響範囲を面的に明らかにすることを試みた。そのうえで、空間開放度(天空率)や緑被率など街区指標を表すパラメーターを算出し、地上気温との対応性を明らかにした。さらに、緑地内における夜間の大気冷却量に着目し、天空率と緑被率のどちらが気温低下に寄与しているのか明らかにしたうえで、緑地内の樹林地と芝生地を対象に冷気の生成場所について検討した。

気温の定点型観測は、1年のうち気温が最も高くなる8月上旬から中旬にかけて、大阪城公園とその周辺都市部を対象として連続的に実施した。また、緑地周辺の気温は空間的に大きく変動することが予想されるため、自動車による移動型観測を前述の

定点型観測と併用しておこない、空間的により密な気温情報を得た。このような観測を積み重ねることで緑地の気温低減効果の定量化が可能となり、屋外におけるサーマルストレスの緩和など都市の暑熱環境対策や都市計画での緑地の有用性について議論する基礎資料となる。

## 2. 観測概要

### 2.1. 定点型観測

大阪府大阪市中央区に位置する大阪城公園の大規模緑地とその周辺都市部を対象に、定点型観測による地上気温の連続測定を実施した。以後、文章中で単に公園と呼ぶ場合は大阪城公園、都市部と呼ぶ場合には大阪城公園に隣接する市街地を指すことにする。

大阪城公園は総面積 105.6ha を有する広大な都市公園であり、公園内には芝生地や堀などがある (Fig.1)。その他、大阪城ホール、多目的グラウンドなどレクリエーションやスポーツを楽しむ施設が多数存在し、サクラやウメなどの落葉樹を中心に様々な種類の植物が植樹されている。そのため、春

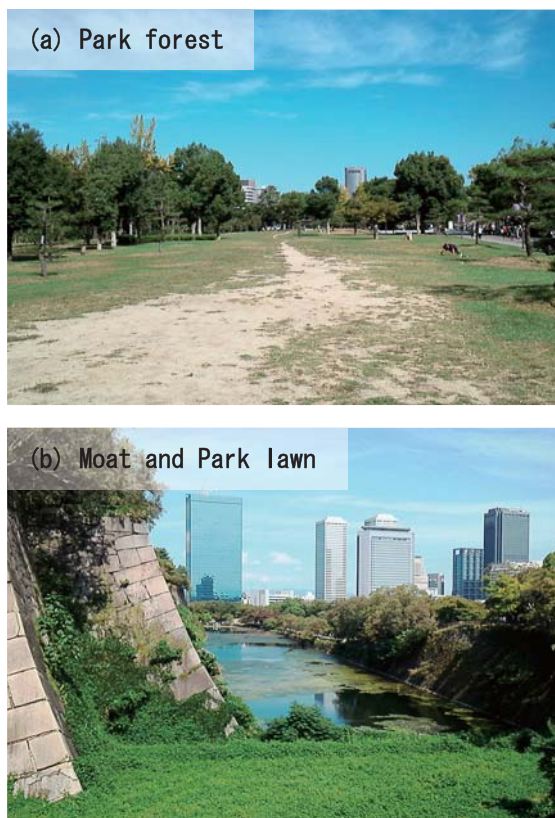


Fig. 1. The state of the Osaka Castle Park. (a) Park forest, (b) Moat and Park lawn.

季には花見や堀の水辺に集まる野鳥を求めて多くの人々が訪れる。さらに、夏季には避暑地として利用されることが多く、都会のオアシスとしても市民から愛されている。その中で、我々は2007年7月の好天静穏日の日中に、Terra 衛星に搭載されたASTER データから大阪平野の表面温度を解析した。その結果、大阪城公園内に存在する緑地の表面温度は周辺都市部と比べて 10℃以上低いことが確認された (Fig.2)。

大阪城公園周辺における夏季日中の主風向は、海風成分の南西風である。また、夜間の主風向も日中と同様に南西風が支配している日が多く、陸風 (東風) は明瞭でない。これは、夜間に都市部で発生する高温域が大阪平野内に広く分布し、陸上の気温が低下しづらいことに起因する。

気温の観測地点は大阪城を中心とした周囲約 1km の範囲内にあり、公園の緑地内に 5 地点、周辺の都市部に 9 地点設けた。自動車排熱等の局所的な熱の影響を受けないように、測定器は街灯や樹木を利用して地上高約 2.5m に設置した。測定期間は 2007 年 8 月 1~15 日である。気温の測定には、重田ほか (2008) によって開発された自然通風式の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した (Fig.3)。気温のサンプリング間隔は 30 秒毎であり、解析にはその 15 分平均値を用いた。

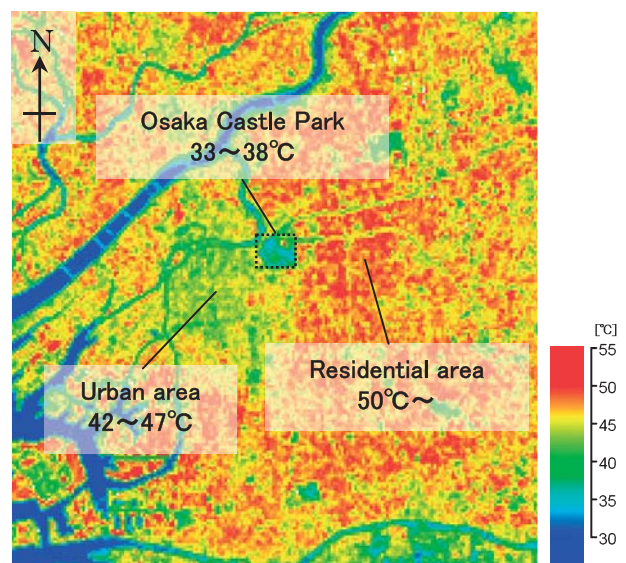


Fig. 2. Surface temperature of Osaka Castle Park and its surrounding areas from the thermal image (at 10:30 am on July 28, 2007).

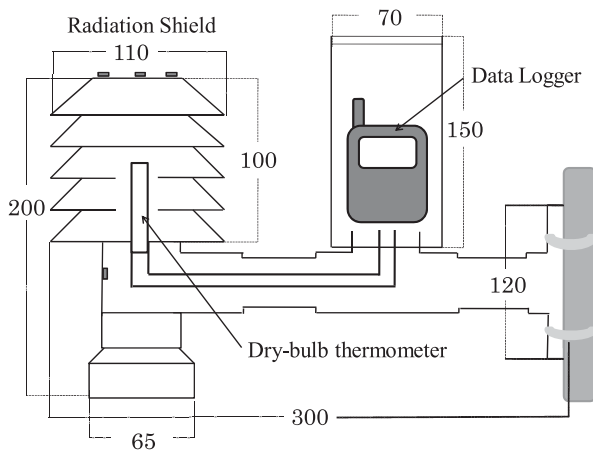


Fig. 3. Measuring instrument used for our observations. Numerals indicate millimeter.

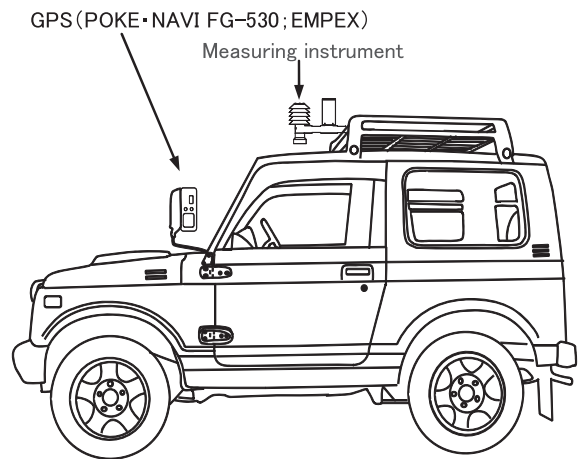


Fig. 4. Observation car and probe.

### 2.2. 移動型観測

にじみ出し現象の影響を詳細に把握するためには、前述の定点型観測をおこなった範囲よりも広範囲の気温分布と風の情報が必要となる。広範囲の気温を測定するための方法としては、AMeDASなど定点型観測が代表的であるが、一般に観測点の設置空間密度は粗いため、気温の面的空間分布を詳細に把握するのは難しい。そこで、簡易的に観測点の密度を高める手法として自動車を利用した移動型観測がある。本研究では、定点型観測と移動型観測を併用することで、より詳細な観測データを取得した。

既往研究の多くは、にじみ出し現象の出現する時間帯とクールアイランド強度(都市部の気温-公園の気温)の極大時刻が一致すると報告している(Honjo et al., 2003; 成田ほか, 2004)。その中で、夏季に大阪城公園と周辺都市部の気温差が最大となるのは0時前後とされている(竹林・森山, 2005)。したがって、移動型観測は、クールアイランド強度が最も大きくなる時間帯と推測される23時と1時を対象にして、好天静穏日の4日間(2007年8月7, 8, 9, 11日)実施した。移動型観測では、前述の測定器を観測車両(E-JA11V; スズキ社)からの排熱の影響を受けないよう注意を払い、観測車両の上部、地上高約1.7mの位置に取り付けた。さらに、観測中の測定位置を知るためにGPS(POKE-NAVI FG-530; EMPEX社)を観測車両のドアミラー部分に設置した(Fig.4)。測定間隔は気温・位置情報ともに1秒毎である。

移動型観測のルートは大阪城を中心とする2km四方の範囲内で、自動車排熱等の局所的な影響をで

きるだけ避け、様々な街路幅・街路方向、天空率などを含むよう選定した(Fig.5)。走行速度は周囲の状況によって若干異なるが、移動型観測を1時間以内に終了させるため時速40~50km程度とした。解析時には、移動型観測を実施した範囲を緯度・経度方向ともに200m間隔で格子状に分割し、各格子内を通過した際に測定された気温を平均化した。そして、平均化した気温をその格子の代表気温として算出した。

風向・風速の測定は、公園を中心とした東西南北の各方角で実施した。移動型観測のルート上に測定地点として8地点選定し、観測車両で通過する際に一時停止して測定した(Fig.5)。風速の測定には微風速測定器(WIND ESSE; EMPEX社)を使用し、風向は微風でも感知できるようにビニルテープを

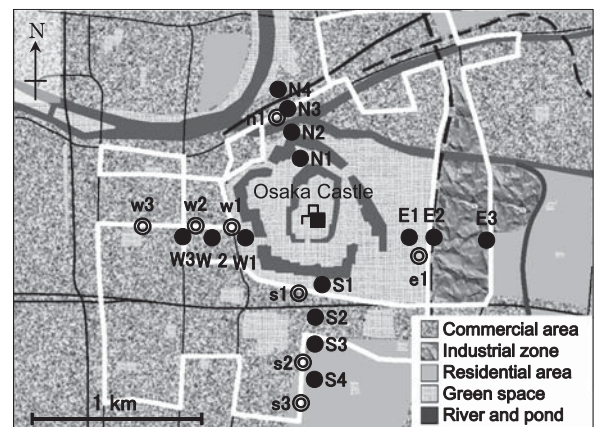


Fig. 5. Map of Osaka Castle Park and its surrounding area showing the locations of the observation sites. ●: observation points of air-temperature, ■: Osaka district meteorological observatory, ⊙: observation points of temperature wind speed and direction. White line indicate moving observation route.

細く裂いて約 1m の棒の先端に取り付けたものを利用した。風向はビニルテープがなびく方向を方位磁石で読み取り決定した。風向・風速ともに測定間隔は 15 秒毎である。なお、にじみ出しは気温差に起因した重力流であり、既往研究（たとえば、永谷ほか、2007）のほとんどが数分間の平均値で議論している。したがって、本研究においても 3 分平均値を適用した。また解析には、大阪管区気象台が測定している風向・風速の測定値も用いた。

### 2.3. 測定値の補正方法

作成した気温測定器の実用性を定量的に確認するため、観測時と同様の気象条件下で測定値の器差補正をおこなった。大阪管区気象台の測定値をもとに較正済みの自作測定器 1 台（気象台測定値とのバイアスは +0.1°C）を、検定の基準器として用いた。その結果、測器間の器差はセンサー自体の測定誤差を含めても ±0.2°C であった。地上気温の水平分布の作成にあたっては、移動型観測と定点型観測で得られた測定値を併用した。なお、移動型観測と定点型観測では測定高度が 0.8m ほど異なるため、測定誤差のまた検証もおこなった。その結果、この測定誤差は前述の測器間の器差（±0.2°C）よりも小さく、定量的な結果に影響がないと判断したため、高度補正は施さなかった。

一方、前述の移動型観測は、移動の時間に起因する時間的な変化と観測車両自体の移動にともなう空間的な変化の両方の情報が含まれていることになる。ここでは空間的な変化について明らかにしていくため、時間的な変化に対してはある時刻へと補正する必要がある。そこで、式 (1) を用いて時刻補正をおこなった。一方、風向・風速値については非線形的に変化するため、時間補正を施さなかった。また、気温変化量は場所によって大きく異なることが予想されるため、本研究では距離の 2 乗に反比例して加重平均する客観解析法を用い、気温変化量に対して重み付けをおこなった。

$$T_i = t_i + \sum_{k=1}^n \Delta T_k d_{ki}^{-2} / \sum_{k=1}^n d_{ki}^{-2} \quad (1)$$

$T_i$  は補正後の気温 (°C)、 $t_i$  は地点  $i$  で測定された気温 (°C)、 $\Delta T_k$  は観測開始時刻から地点  $i$  に移動するあいだに定点型観測点  $k$  で測定された気温変

化量 (°C)、 $l$  は地点  $i$  と定点型観測点  $k$  との距離 (m)、 $n$  は定点型観測点の総数 ( $n=14$ ) をそれぞれ意味する。

## 3. 結果

### 3.1. 地上気温

大阪城公園のクールアイランド現象を把握するため、大阪管区気象台の観測データから、日積算日照時間が 6.0 時間以上かつ日積算降水量が 0.0mm の無降水日を選んだ。また、クールアイランド現象には夜間の放射冷却が深く関わっていると予想される。そのため、大阪管区気象台で観測された夜間雲量が 2 以下（上層雲は除く）の条件も加えた。

その結果、2007 年 8 月 5～12 日の 8 日間で上記 3 つの条件を満たし好天静穏日に該当した。この好天静穏日に都市部と公園それぞれで測定された地上気温の差を求め、その後、同一時刻ごとにアンサンブル平均した。

都市部と公園の気温差を算出する際には基準となる地点について注意を払う必要がある。特に、複雑な土地被覆構造を有する都市部では局所的な熱の影響を受けやすい。そのため、ヒートアイランド強度を算出する際には、数地点の平均気温を用いる場合が多い（榊原ほか、1998；重田・大橋、2009）。しかしながら、都市と公園の境界部では双方の熱的影響を含んでいることが推測され、数地点の平均値を用いて議論することはあまり適切ではない。

そこで、本研究では、土地被覆形態および境界部からの距離を考慮し、代表的な 1 地点を選定した。その結果、都市部の気温には天空率が最も小さく、公園の西側（一般風の風上側）に位置する W3 の地点とした。一方、公園の気温には緑被率が最大かつ都市部との境界から最も離れた E1 とした。この気温差（都市部の気温－大阪城公園の気温）を「クールアイランド強度」と定義する。クールアイランド強度を算出した結果、日の出から日中にかけて小さく、深夜から未明にかけて大きくなる傾向をもつ（Fig.6）。特に、正午頃はクールアイランド強度が負の値となっており（最大 -1.2°C）、都市部の気温が公園よりも低いことを意味している。この要因として、都市部（W3）では高層建物の影響によって公園よりも日射を受ける表面積が大きくなり、都市部の熱容量の総和は公園に比べて大きくなる。実際

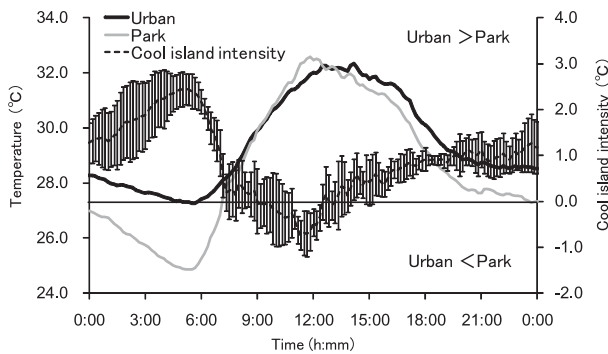


Fig. 6. Temporal change of urban and park air-temperatures, the cool-island intensity (August 5-12, 2007). Error bar indicate standard deviation.

に、都市部では公園よりも最高気温を記録する時刻が2時間以上遅れている (Fig.6)。また、建物高度が高くなると、ビルキャニオンでの日射量が相対的に少なくなる。以上のことから、都市部では日中の気温上昇率が公園よりも小さくなり、その結果として公園よりも気温が低く形成された可能性が高い。

一方、クールアイランド強度が強くなる時間帯は午前0時以降であり、午前4~5時に+2.0°C以上(最大+2.8°C)を示した。泉ほか(2008)の皇居を対象とした研究ではクールアイランド強度が+2.0°C以上、一方、成田ほか(2004)の新宿御苑を対象とした研究では、最大+3.0°Cが報告されている。したがって、本研究で観測された夜間のクールアイランド強度は、既往研究の報告と同程度であることがわかる。しかしながら、公園の気温を既往研究と同様に数地点(たとえば、N1,W1,S1,E1)の平均値で算出した場合には、前述の値よりも小さく約1.0°Cとなる。これは、この地域特有の南西風によって都市部起因の空気塊(暖気)が公園内に流入してくるか、もしくは、緑地で生成された冷気が公園内にあまり蓄積されることなく、都市部へ流出した結果であると推測される。つまり、南西風が卓越すれば(風速が大きくなれば)クールアイランド強度は小さくなると考えられる。

そこで、この南西風が夜間のクールアイランド強度に与える影響を調べるため、それぞれの日で記録された夜間のクールアイランド強度と大阪管区気象台で測定された風速を比較した。ここでは、風速とクールアイランド強度ともにクールアイランド強度が大きくなる午前3~6時の平均値を用いた。相関分析の結果、風速とクールアイランド強度のあいだには強い負の相関( $r = -0.78$ )が認められ、

前述の推測を示唆するものとなった (Fig.7)。

### 3.2. 風向・風速

各地点における好天静穏日4日間の平均的な風向・風速を Fig.8 に示す。既往研究の結果を参考に、本研究では公園から都市部に放射状に流出する0.5m/s未満の風をにじみ出し現象として定義する。にじみ出し現象の観測をおこなった4日間は、南西寄りの一般風が卓越していた。大阪管区気象台における4日間の風向のベクトル平均とその標準偏差は、23時が253.1°(標準偏差:28.3°)、1時が247.5°(標準偏差:18.4°)であった。一方、平均風速は23時が2.1m/s(標準偏差:0.3m/s)、1時が2.2m/s(標準偏差:0.4m/s)となっており、観測期間中では日による大きな差異は認められなかった。そこで、以後の解析では4日間の平均値を用いることにする。

風向は23時・1時ともに南西寄りの風が卓越しており、公園から都市部に放射状に流出する風は確認できなかった。大阪管区気象台の測定地点は地上高約50mであるため、公園を含む近辺の上層風を観測していることを意味する。公園の周縁で風速0.5m/s未満の地点は、23時・1時ともにe1とs1であり、この地点の風は公園から都市部に向かって吹走していた。e1では風向が西風を示しているため上述の南西風が影響している可能性がある。一方のs1は北寄りの風を示しているため、にじみ出し現

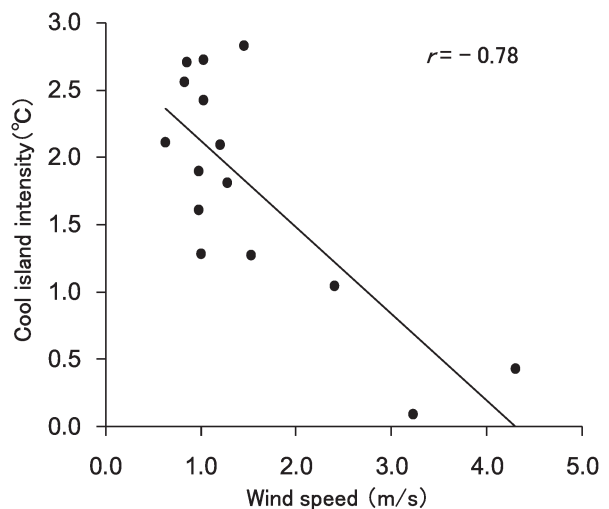


Fig. 7. Scatter diagrams of the wind speed and the cool-island intensity. The value of symbol  $r$  represents the correlation coefficient (August 1-15, 2007).



Fig. 8. Horizontal distribution of mean wind speed and direction (August 7, 8, 9, 11, 2007). (a) 2300 JST, (b) 0100 JST. Numerical indicate wind speed.

象の特徴である気温（気圧）差に起因した冷気の流出が起こっていることが示唆される。

#### 4. 考察

##### 4.1. 地上気温の水平傾度

ここでは東西方向の地上気温の水平傾度に注目し、一般風である南西寄りの風が公園内で生成された冷気に与える影響を検討する。23時と1時における地上気温と風向の東西分布を Fig.9 に示す。公園の西側に位置する W1～W3 は気温と公園までの距離に明瞭な関係が認められず、W1 と W3 のあいだでは約 0.3℃の気温差であった。一方、W1～W3 における 23 時から 1 時の気温低下量は公園の東側に位置する E1 と E2 の気温低下量に比べると小さい。これは南西風によって都市部起因の空気塊（暖気）の影響を受けているものと推測される。逆に、E1～E3 の気温低下量はそれぞれ 0.5℃～0.6℃であり、西側の地点よりも大きい。したがって、公園の東縁に位置する地点では公園内で生成された冷気

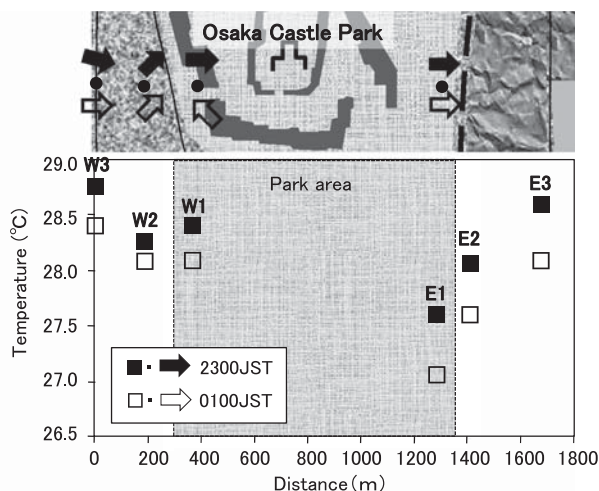


Fig. 9. Air-temperature and wind direction distributions in the east-westward (August 7, 8, 9, 11, 2007).

の影響を顕著に受けていると判断される。

##### 4.2. 大気冷却効果の把握

大阪城公園の大気冷却効果を定量的に把握するため、公園内で生成される冷気の温度を成田ほか（2004）によって考案されている「温度比」を用いて決定した。算出方法を式（2）に示す。温度比が 1.0 のとき都市部の気温と各測定地点の気温が同値になり、温度比が 0.0 のとき公園の気温と各測定地点の気温が同値になるため、ここでは温度比が 0.0 に近ければ公園内の気温、1.0 に近ければ都市部の気温の影響を受けていると判断される。したがって、温度比が 1.0 になるまでの水平距離を緑地の大気冷却効果が及ぶ範囲とみなすことができる。また、この範囲は、にじみ出し現象による影響範囲とも言える。

$$TR_i = (T_i - T_p) / (T_u - T_p) \quad (2)$$

$TR_i$  は温度比、 $T_i$  は各測定地点の気温、 $T_p$  は公園の気温（E1）、 $T_u$  は都市部の気温（W3）を意味する。

温度比と風向の東西分布を Fig.10 に示す。温度比が 0.0 に最も近い地点は 23 時の E2 であり、その値は 0.5 を示していた。また、1 時の E2 の温度比は 0.4 と低下していることから、E2 付近の空気塊の半分以上は、公園内で形成された空気塊が移流によって輸送されてきたもの推測され、公園内の影響を強く受けていると判断できる。したがって、公園内で生成された冷気の影響を受けた温度は E2 の 23

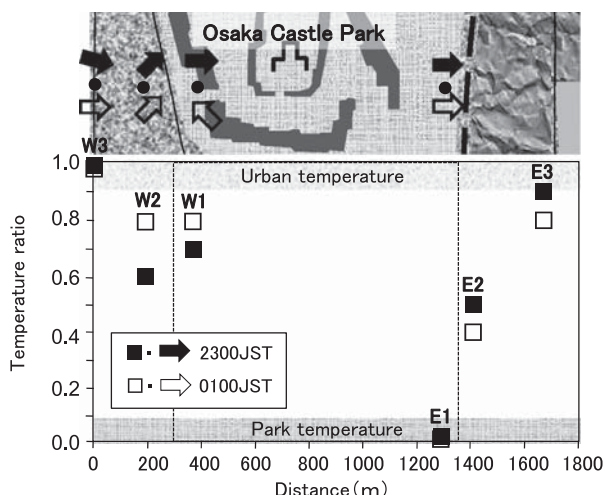


Fig. 10. Air-temperature ratio and wind direction distributions in the east-westward (August 7, 8, 9, 11, 2007).

時の気温とみなすことができ、この時の気温は 28.0°Cであった。E3 の温度比は 23 時・1 時ともに 0.8 以上を示しているため、公園東側の都市部の気温に近いと判断される。以上の結果から、冷気の影響範囲は E3 の地点までは及んでいないことが考えられる。

#### 4.3. 地上気温の水平分布

2007 年 8 月 5~12 日は好天静穏日が継続し、明瞭なクールアイランド現象が確認された。代表的な事例として 2007 年 8 月 10 日における地上気温の水平分布を Fig.11 に示す。2007 年 8 月 10 日は日中・夜間ともに南西風が卓越する典型的な夏季晴天日である。図中の破線は前述の温度比より算出した冷気の影響範囲であり、公園内で生成された冷気が時間の経過にともない公園東側から隣接する都市部へと流出する様子を捉えている。午前 3 時には一般風である南西寄りの風が卓越していたため、公園内で生成された冷気は公園東側の風下側に流出したと推測される。ここで温度比の結果より、午前 3 時の冷気の影響範囲は公園の東側から約 250m であることがわかる。

#### 4.3. 天空率・緑被率と気温の関係

周辺環境が気温に与える影響を調べるため、天空率・緑被率と各地点で測定された気温を比較する。解析に用いた測定値は、好天静穏日に対してアンサンブル平均した日最高気温と日最低気温である。

天空率は、任意の地表の点から空の見える部分を

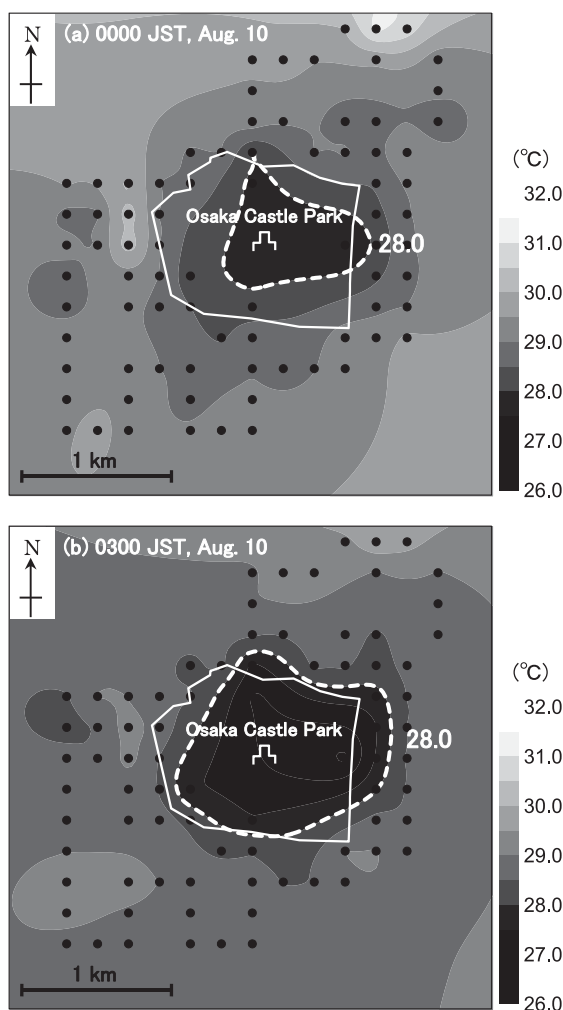


Fig. 11. Horizontal distribution of air-temperature measured at (a) 0000 JST, Aug. 10, and (b) 0300 JST, Aug. 10 in 2007. ●: observation points of air-temperature. White line indicates Osaka Castle Park. Dashed line indicates area of cool influence.

天球に等距離射影し、これをさらに円状水平面に投影したときの円（水平投影面）全体面積に対する割合で求められる。つまり、天空率が大きい場所ほど建物などの天空を遮る障害物が少ないことを意味する。各測定地点の天空率は、魚眼レンズカメラを用いて各測定地点の地上 0.5m の高さから天空を撮影し、その後、画像から全天写真解析プログラム CanopOn2 (<http://takenaka-akio.org/etc/canopon2/>) を用いて算出した。

一方の緑被率は、ある面積内で緑地が占める割合のことを指す。緑被率が大きな地域では、日中に蒸散と日射の遮蔽効果、夜間には都市部との熱容量の違いに起因した冷気の生成など、昼夜ともに気温が都市部に比べて相対的に低くなることが指摘され



ている(森山, 2004). 本研究では, 約 200m の間隔で定点型観測の地点を設けた. そのため, 各測定地点での緑被率は, それぞれの地点から周囲 100m の範囲内に含まれる緑地面積を対象とした. なお, 大阪城公園内には, 堀が存在しているため, 水面の影響を無視することはできない. そこで, 測定地点の選定には細心の注意を払い, 測定地点から周囲 100m の範囲内に水面が含まれないようにした. 測定地点を中心に 200m の範囲を 10m 間隔の格子で分割し, 格子内の半分以上が樹林や芝生で占めていれば緑地と判断した. この方法で全格子 400 個中に含まれる緑地数を求め, その割合を緑被率とした. 天空率と日最高気温・日最低気温の相関を Fig.12 に, 緑被率と日最高気温・日最低気温の関係を Fig.13 にそれぞれ示す. 各相関分析の結果, 天空率

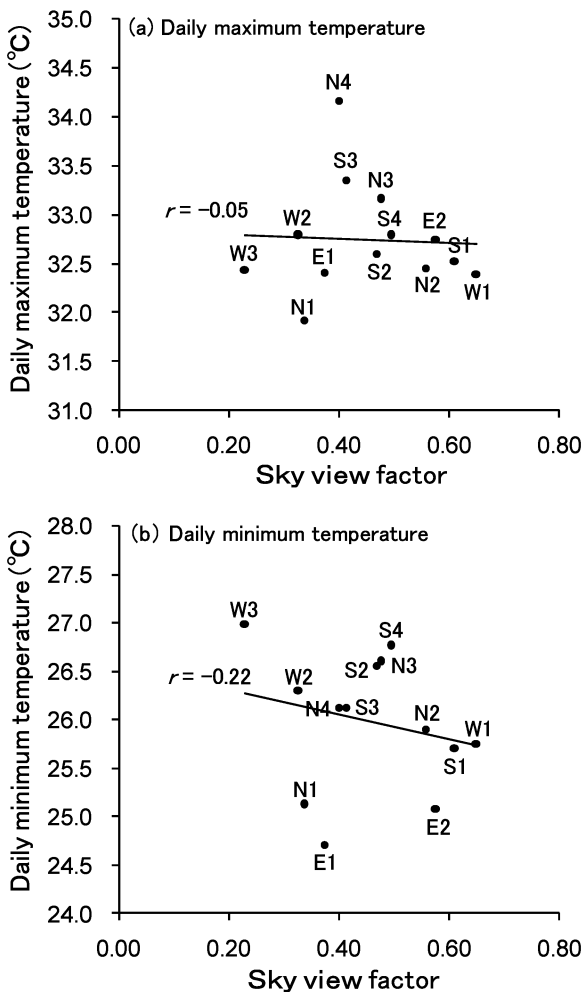


Fig. 12. Scatter diagrams of the sky view factor and the (a) daily maximum air-temperature, (b) daily minimum air-temperature. The value of symbol  $r$  represents the correlation coefficient.

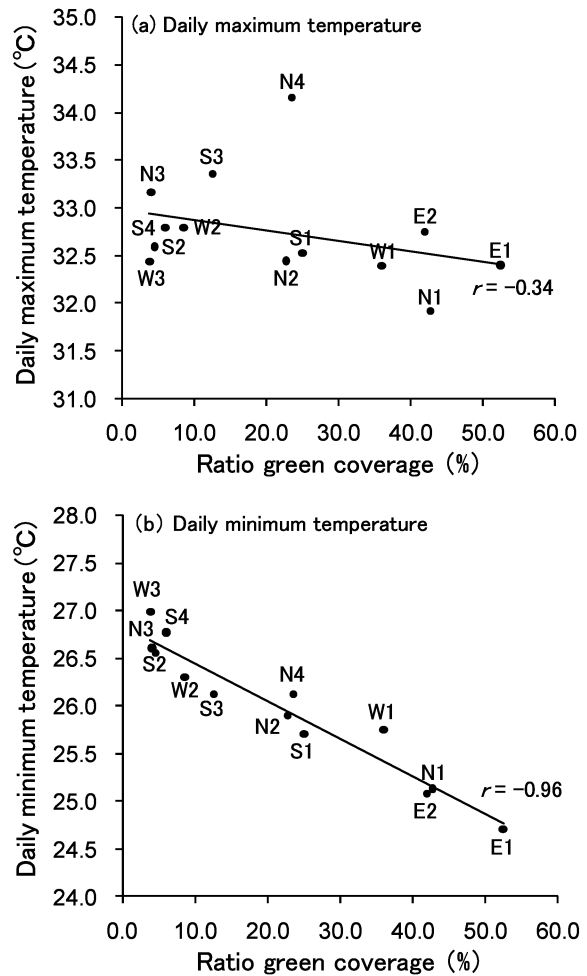


Fig. 13. Scatter diagrams of the ratio of green coverage and the (a) daily maximum air-temperature, (b) daily minimum air-temperature. The value of symbol  $r$  represents the correlation coefficient.

と日最高気温・日最低気温, 緑被率と日最高気温には有意な相関は認められなかったが, 緑被率と日最低気温には強い負の相関 ( $r = -0.96$ ) が認められた (Fig.13b). 緑地における夜間の地表面温度は, 都市部の人工被覆で構成された地表面に比べて低い. さらに, 人工被覆面が少なく緑に覆われた地点ほど大気中へ輸送される夜間の顕熱は相対的に小さいか, もしくは逆向きになる. したがって, 早朝の緑地 (Fig.5 ; E1 と N1) は都市部よりも相対的に大気が低温となる.

#### 4.5. 天空率・緑被率と夜間の大気冷却量の関係

ここでは夜間の負の顕熱フラックスで生じる大気冷却量に着目し, 天空率と緑被率のどちらが気温低下に大きく寄与しているのかを把握する. 夜間の

大気冷却量  $\Delta T$  は式 (3) から求めた.

$$\Delta T = T_d - T_m \quad (3)$$

$T_d$  は日没前 18 時の気温,  $T_m$  は翌朝 9 時まで記録された日最低気温を意味する. 夜間の大気冷却量と天空率・緑被率の関係を Fig.14 に示す. なお, ここでは日中の蓄熱に対する議論をより厳密にするため, 日照時間が 10.0 時間以上の快晴日であった 7 日間 (8 月 5・6・7・9・10・11・12 日) のアンサンプル平均値を示してある. 相関分析の結果, 夜間の大気冷却量と天空率のあいだには有意な相関は認められなかった (Fig.14a). その一方で, 夜間の大気冷却量と緑被率には有意な正の相関 ( $r = +0.67$ ) が認められている (Fig.14b). したがって, 天空率が大きな地点よりも緑被率が大きい地点で

夜間の気温は低下しやすいことが言える. しかし, ここから公園内の緑地のどこで冷気が生成されているかを特定するのは困難である.

緑地内の冷気の生成場所に関してはいくつか報告がみられる (たとえば, Honjo et al., 2003 ; 菅原・成田, 2003 ; 成田ほか, 2004 ; 永谷ほか, 2007 ; 成田・菅原, 2011). 夜間の冷気生成に対する放射冷却の寄与は大きいとされており, 一般に同じ緑地であっても空間開放度 (天空率) の小さな樹林地よりも大きな芝生地などでその効果が顕著になる. 以後, 文章中で樹林地の気温と呼ぶ場合は, 林床部で測定された気温を指す. 成田ほか (2004) は, 新宿御苑内での地表面温度と気温の観測から, 夜間は樹林地よりも芝生地で低温になり, 冷気が芝生地で生成されていることを見出した. さらに, 竹林ほか (2002) は, 地面と植被層それぞれについて熱収支式を作成した 2 層モデルから, 樹林地と芝生地の熱収支を考えた. その結果, 夜間の大気冷却量 (負の顕熱フラックス) に関しては, 樹林地のほうが芝生地よりも葉面積指数に比例して大気冷却量も大きくなることが指摘されている. したがって, この事実は, 葉面積の多い樹林地で冷気が生成されやすいことを示唆する.

以上を鑑み, 樹林地と芝生地の空間開放度の違いによる夜間の大気冷却量の差に着目してみた. 大阪城公園の緑地には芝生地のような空間開放度が大きな地点 (Fig.5 ; S1 と W1) と, 樹林地のような天空を樹木で覆われた空間開放度の小さな地点 (Fig.5 ; E1 と N1) が混在している. ここでは空間開放度の大きな芝生地と, 反対に小さな樹林地を対象としてその気温差を検討する. 芝生地には S1, 樹林地には E1 で測定された値をそれぞれの代表気温として用いた. 樹林地である E1 周辺では, 樹高 12~14m のクスノキとケヤキの 2 種が混生している状態である. また, 樹高 10m ほどのイチョウなども植生しており, 日中には広大な日陰空間となる. 芝生地と樹林地に対するクールアイランド強度の時間変化を Fig.15 に示す. ここでのクールアイランド強度は, 都市部の気温 (Fig.5 ; W3) から芝生地 (もしくは樹林地) の気温を引いたものである. 夜間のクールアイランド強度は芝生地よりも樹林地で大きく, 芝生地の約 2 倍 (最大+3.8°C) にまで達していた.

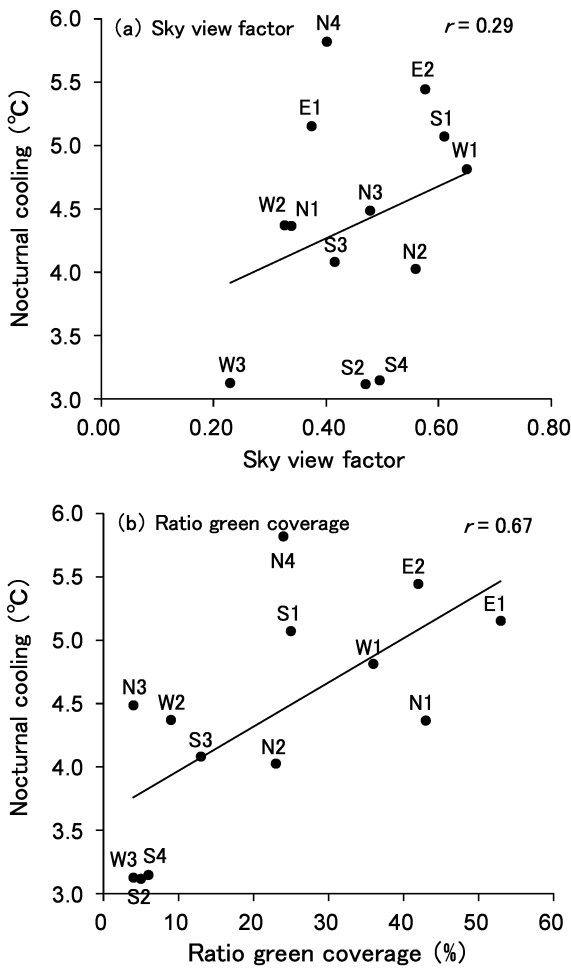


Fig. 14. Scatter diagrams of the nocturnal cooling and the (a) sky view factor, (b) ratio of green coverage. The value of symbol  $r$  represents the correlation coefficient.

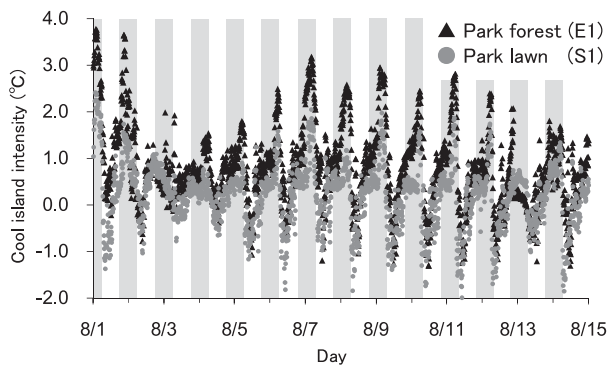


Fig. 15. Comparison of cool-island intensities between the park lawn and the park forest (August 1-15, 2007).

ここで注目すべき点は、芝生地の緑被面積が樹林地のそれに比べて半分以下であるにもかかわらず、夜間の大気冷却量はほぼ同値ということである (Fig.14b)。したがって冷気の生成場所は、成田ほか (2004) が指摘したような空間開放度の大きな芝生地の可能性もある。しかし、天空率と大気冷却量のあいだに明瞭な正の相関はみられなかったため、本研究では冷気の生成場所が芝生地であると断定できない。つまり、天空率と大気冷却量のあいだに相関が認められないことは、鉛直1次元的な熱交換にともなう冷気の生成よりも、むしろ水平もしくは上空からの移流の影響が強く現れていると推測される。

そこで、水平方向の移流を考えてみる。冷気生成時の夜間における芝生地 S1 の地上風向は、観測期間中の4日間全ての日で北寄りであった。E1のある樹林地はS1のある芝生地の北東方向に位置しているため、放射冷却によって芝生地周辺で形成された冷気が樹林地まで輸送されたとは考えにくい。

次に鉛直方向の対流に着目する。樹林地の熱交換効率率は芝生地よりも大きく、さらに大気冷却面として寄与する葉面積も樹林地が芝生地に比べて相対的に多い。成田ほか (2004) や菅原ほか (2011) は、新宿御苑の樹林地内で気温の鉛直観測を実施し、樹林地内では樹冠上部 (11.8m) と地上 1.8m 以下の林床部が特に低温になることを報告している。したがって、成田ほか (2004) や前述の竹林ほか (2002) の結果を考慮すれば、樹冠上部で生成された冷気が地表付近まで沈降し蓄積したと考えるのが妥当である。本研究では気温の鉛直観測をおこなっていないため直接的な確認はできていないが、大阪城公園では芝生地よりも樹林地で冷気が生成されやすい

と推測される。

## 5. まとめ

### ・地上気温

大阪城公園における夜間のクールアイランド現象は明瞭であり、クールアイランド強度は午前4～5時に+2.0°C以上(最大+2.8°C)を示した。ただし、正午頃はクールアイランド強度が負の値となっており、都市部の気温は公園よりも最大で-1.2°C低くなっていた。

### ・にじみ出し現象

観測を実施した23時と1時には南西寄りの風が卓越していた。そのため、明瞭な放射状のにじみ出し現象は確認できなかった。ただし、公園南側では一般風とは相反する弱い北風 (0.5m/s) が観測され、にじみ出し現象の存在を示唆する結果となった。

### ・冷気の影響範囲

冷気はこの地域特有の南西寄りの一般風の影響を受けて公園東縁から都市部に流出しており、その影響範囲は最大で約250m認められた。

### ・天空率・緑被率と気温の関係

天空率と日最高・日最低気温、緑被率と日最高気温には有意な相関は認められなかったが、緑被率と日最低気温のあいだには強い負の相関 ( $r = -0.96$ ) が認められた。日中の樹林地内は、芝生地よりもさらに低温となることが予想されたが、実際に記録された日最高気温は必ずしも樹林地内で低いとは限らなかった。

### ・夜間の大気冷却量と天空率・緑被率の関係

夜間の大気冷却量と天空率のあいだには有意な相関が認められなかった。一方で夜間の大気冷却量と緑被率のあいだには有意な正の相関 ( $r = +0.67$ ) が認められた。公園内のどこが冷気の生成場所になっているのかを特定するため、空間開放度の違いによる夜間の大気冷却量の差に着目し、芝生地と樹林地を対象としてその気温差を検討した。その結果、放射冷却によって芝生地周辺で形成された冷気が樹林地まで輸送されるよりも、樹冠上部で生成された冷気が地表付近まで沈降し蓄積したと考えられる。したがって、大阪城公園では芝生地よりも樹林地で冷気が生成されやすいと推測される。

## 6. 展望

緑地内が夜間に周辺市街地と比べて低温であることは本研究からも確認されたが,新たに都市内に大規模緑地を設置することは容易ではない.そのため,現存する緑地をいかに効果的に活用するかがヒートアイランド緩和策の課題となる.緑地が大気を冷やすメカニズムは,夜間と日中で大きく異なるようである.夜間は安定成層が形成されて大気混合が弱まるため,緑化を施した地域を中心に気温の低下が期待できる.一方,日中は必ずしも公園の気温が低くなるとは言えないようである.また,日中は夜間に比べて風も強く,乱流混合層がよく発達するため,緑地と低温域の水平分布は夜間と一致しづらくなる.つまり,緑化を施したにもかかわらず,その地域の気温低下に貢献しにくいという現象が起こり得る.したがって,日中は大気の冷却を期待するよりも,放射環境を改善することに重点を置いて,樹林地のような避暑地を都市内に配置するのが望ましいと思われる.一方,夜間の気温低下には緑地面積の増加が,大気をどれだけ冷やせるかという冷却ポテンシャルに結びつくため,そのようなヒートアイランド対策導入の検討が示唆される.

## 謝辞

本研究を進めるにあたり,気象観測に従事してくれた岡山理科大学学生の高根雄也氏(当時),気象観測データを提供して頂きました気象庁,定点型観測点の設置にご協力して頂きました大阪市ゆとりとみどり振興局,大阪府警察本部ならびに各所轄の方々に心より感謝の意を表します.また,本論文をまとめるにあたり査読者の方々ならびに編集委員には多くの有益なご意見,ご指摘を頂きましたことに心より感謝申し上げます.

## 引用文献

- Eliasson, I. and Upmanis, H. (2000) : Nocturnal Airflow from Urban Parks-Implications for City Ventilation. *Theor. Appl. Climatol.*, **66** : 95-107.
- 本條毅, 水谷敦司, 高倉直 (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** (4) : 323-328.
- Honjo, T., Narita, K., Sugawara H., Mikami, T., Kimura K. and Kuwata, N. (2003) : Observation of cool island effect

in urban park (Shinjuku Gyoen). *Fifth International Conference on Urban Climate*, vol.2 : 261-264.

- 井原智彦, 玄地裕 (2006) : 被害算定型ライフサイクル影響評価手法によるヒートアイランド現象の環境影響評価. *日本建築学会環境系論文集* **73** (634) : 1407-1415.
- 泉岳樹, 三上岳彦, 清水昭吾, 岡曉子 (2008) : 皇居のクールアイランド効果について(その2)-2006年, 2007年8月の観測結果-. *日本気象学会 2009年度春季大会講演予稿集* **93** : 296.
- 環境省 (2004) : ヒートアイランド対策大綱. ヒートアイランド対策関係府省連絡会議報告書.
- 神田学, 森脇亮, 高柳百合子, 横山仁, 浜田崇 (1997) : 明治神宮の森の気候緩和機能・大気浄化能力の評価 (1) 1996年夏期集中観測. *天気*, **44** (10) : 713-722.
- 丸田頼一 (1972) : 公園緑地の都市自然環境におよぼす影響. *都市計画*, **69**・**70** : 49-77.
- 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.
- 森山正和 (2004) : ヒートアイランドの対策と技術. 学芸出版社(京都府).
- 永谷結, 梅木清, 本條毅, 菅原広史, 成田健一, 三上岳彦 (2007) : 長期観測による新宿御苑の「にじみ出し現象」の解析. *環境情報科学論文集*, **21** : 507-512.
- 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にじみ出し現象. *地理学評論*, **77** : 403-420.
- 成田健一, 菅原広史 (2011) : 都市内緑地の冷気のにじみ出し現象. *地学雑誌*, **120** : 415-425.
- 榊原保志, 田中忍, 伊藤由香 (1998) : 長野市における夜間ヒートアイランド強度に対する風速と接地逆転の強さの関係. *天気*, **45** (2) : 119-126.
- 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 (2008) : 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* : 98-99.
- 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) : 4434-54.
- 菅原広史, 成田健一 (2003) : クールアイランドの形成. *日本風工学研究会誌*, **97** : 23-27.
- 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** (5) : 109-304.
- 菅原広史, 田中博春, 成田健一, 中野智子, 三上岳彦  
(2011):都市内緑地におけるクールアイランドの鉛直構造. 地学雑誌, **120** : 426-432.
- 竹林英樹, 森真佐雄, 芝池英樹, 森山正和 (2002):斜面冷気流における冷気生成機構に関する研究. 日本建築学会技術報告集, **16** : 181-184.
- 竹林英樹, 森山正和 (2005):大阪城公園からの冷気のにじみ出し現象の測定結果. 関東の農業気象, E-Journal Vol.2 : 24.
- 東海林孝幸, 高野啓太, 北田敏廣 (2010):豊橋市内の中規模緑地におけるクールアイランド現象の調査と周辺市街地に対する冷却効果. 日本ヒートアイランド学会論文集 Vol.5 : 33-38.
- 山田宏之 (1995):都市気温分布と緑地分布の関連についての都市間比較. ランドスケープ研究, **58** (5) : 253-256.
- 全天写真解析プログラム CanopOn2 : <http://takenaka-akio.org/etc/canopon2/>.

---

Corresponding Author Address: Yoshinori SHIGETA,  
Department of Environment Systems, Faculty of Geo-  
environmental Science, Rissho University, 1700 Magechi,  
Kumagaya, Saitama 360-0194, Japan

E-mail:shigeta@ris.ac.jp

別刷請求先 : 〒360-0194 埼玉県熊谷市万吉 1700  
立正大学 地球環境科学部 環境システム学科  
都市気象学研究室 重田祥範