

原著論文

住宅街に囲まれた大規模公園で発生するクールアイランド現象
-岡山県総合グラウンドの事例-

重田祥範¹・高岡利行²・大橋唯太³

Cool Island phenomenon occurring in a large park surrounded by a residential area
-Case of Okayama Prefectural Multipurpose Ground-

Yoshinori SHIGETA¹, Toshiyuki TAKAOKA², Yukitaka OHASHI³

Abstract: Cool-island phenomena were observed at Okayama Prefectural Multipurpose Ground Park during September 19-28, 2007. The cool-island intensity was greater than + 1.0°C throughout the daily cycle. In particular, a cool island clearly appears about 1.5°C at 0000 JST. The surface-air temperature inside the park was lower at night than that around the residential area. Scatter diagram of the daily minimum temperature and green coverage ratio was obtained. The daily minimum temperature and the ratio showed a positive correlation ($r = 0.53$) in the park.

I. はじめに

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, 菅原ほか 2006, 東海林ほか 2010, 重田ほか 2013)。その中で、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に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 and Upmanis 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)」と呼ばれている(丸田 1972)。このにじみ出し現象は、都市部における熱帯夜日数の減少など暑熱環境の緩和策の一つとして近年注目されつつある。

このように、緑地内が夜間に周辺市街地と比べて低温であることは既往研究からも確認されてきた。しかしながら、そのほとんどが気温に限られた研究である。実際に緑地内の熱環境(すなわち気温)の形成メカニズムを解明するためには、その場の熱収支について検討する必要がある。そのため、大気と接する表面温度分布および空間開放度(天空率)や緑被率など街区指標を表すパラメーターと気温の対応性を明らかにすることが必要不可欠となる。

そこで、本研究では住宅街に囲まれている岡山県総合グラウンドのクールアイランド現象とその強度を明らかにすることを試みた。さらに、熱赤外カメ

1. 〒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 Department of Environment Systems, Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University, 1700 Magechi, Kumagaya-shi, Saitama-ken 360-0194, Japan.
2. 〒700-0005 岡山県岡山市北区理大町1-1 岡山理科大学総合情報学部生物地球システム学科 Department of Biosphere-Geosphere System Science, Faculty of Informatics, Okayama University of Science, 1-1, Ridai-cho, Kita-ku, Okayama-shi, Okayama-ken 700-0005, Japan.
3. 〒700-0005 岡山県岡山市北区理大町1-1 岡山理科大学生物地球学部生物地球学科 Department of Biosphere-Geosphere Science, Faculty of Biosphere-Geosphere Science, Okayama University of Science, 1-1, Ridai-cho, Kita-ku, Okayama-shi, Okayama-ken 700-0005, Japan.

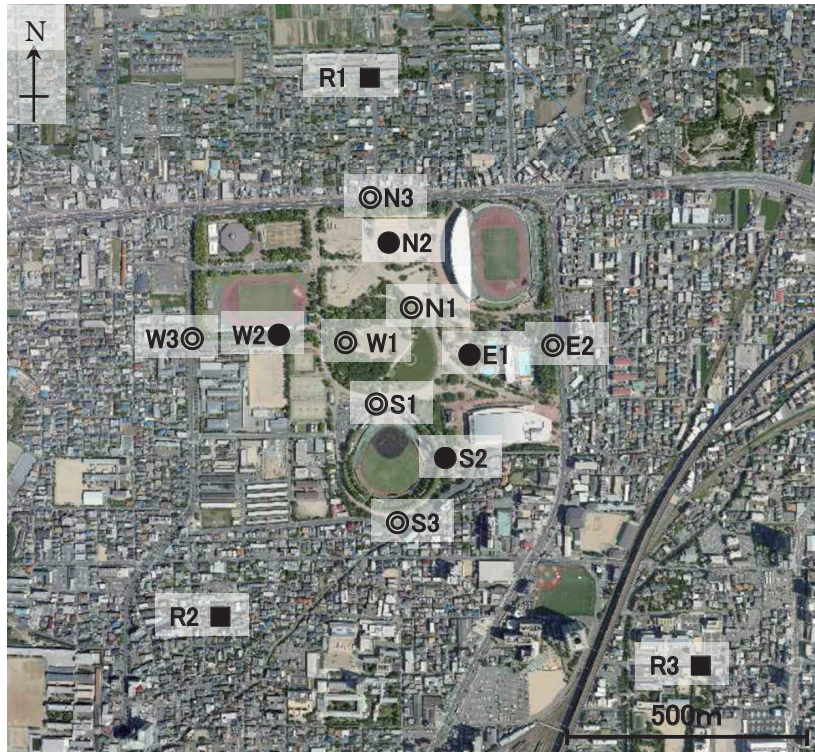


図1. 定点型観測地点. 図中の●は公園内, ■は住宅街区における気温の観測地点を示す. ◎は移動型観測の際に風向・風速の測定をおこなった地点をそれぞれ示す. アルファベットと数値の組み合わせは地点番号を示す.

ラをヘリコプターに搭載して, 上空から岡山県総合グラウンドおよびその周辺を対象に表面温度の測定をおこなった. そのうえで, 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, 地上気温および大気冷却量との対応性を検討していく.

II. 観測概要

1. 定点型観測

岡山県岡山市北区の住宅街に位置する岡山県総合グラウンドとその周辺を対象に, 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岡山県総合グラウンドを指すことにする. 岡山県総合グラウンドは総面積約35haを有する広大な総合公園であり, 公園内には陸上競技場をはじめとして, 体育館, 野球場, テニスコート, 武道館などの各種運動施設がある. その他, 散歩やジョギングが気持ちよくできる園路などが整備されており, 季節を問わずレクリエーションやスポーツを楽しむ人々が訪れ, 多くの市民から愛されている公園である.

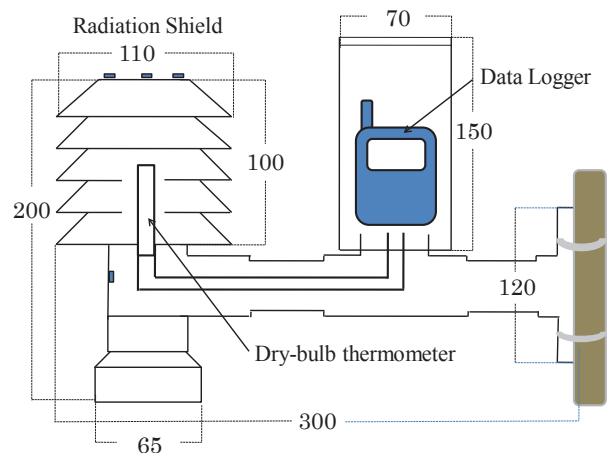


図2. 定点型観測に用いた自然通風式シェルター. 単位はmm.

気温の観測地点は公園を中心とした周囲約1kmの範囲内にあり, 公園内に11地点, 住宅街区内に3地点の合計14地点を設けた. 観測地点の位置関係を図1に示す. 観測期間は日最高気温が30℃以上の真夏日を記録し, かつ日中と夜間の気温差(日較差)が大きくなる2007年9月19~28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(図

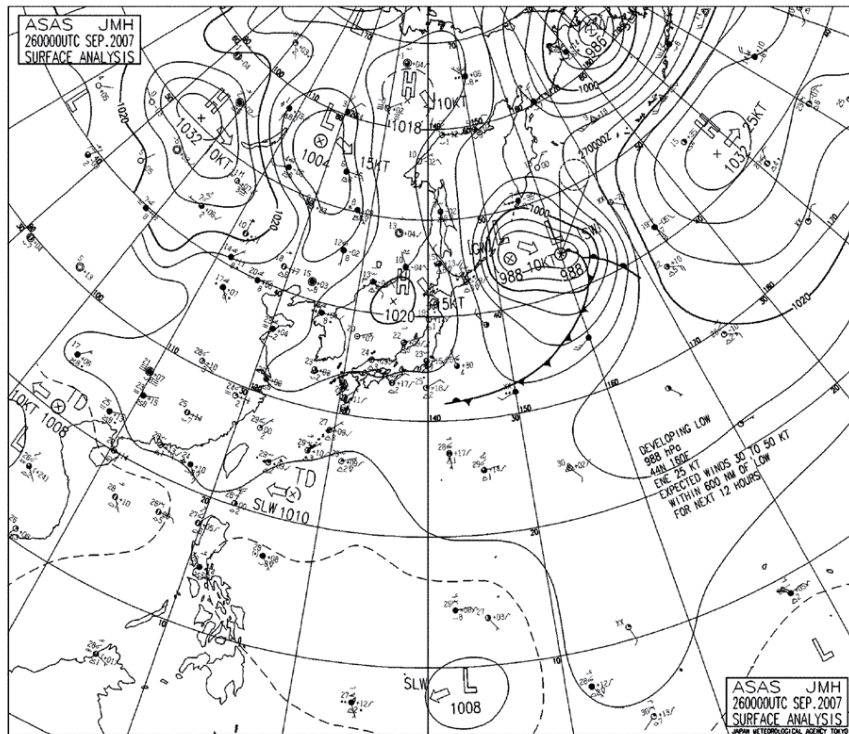


図3. 2007年9月26日午前9時(JST)の地上天気図(気象庁提供).

2). 測定器は自動車排熱等の局所的な熱の影響を受けないように、街灯や樹木を利用して地上高約2.5mに設置した。気温のサンプリング間隔は30秒毎であり、解析にはその20分平均値を用いた。

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等を利用した移動型観測がある(たとえば、重田 2013)。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(公園外の気温から公園内の気温を差し引いたもの)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)。

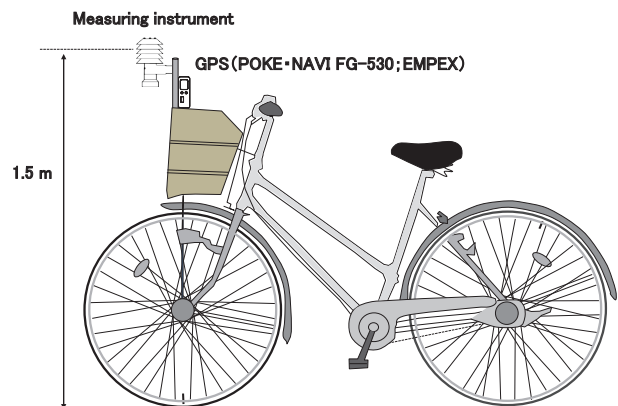


図4. 移動型観測に用いた自転車と測定機器の取り付け位置。

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0時から3時にかけておこなった。観測対象日は岡山県内が移動性高気圧に広く覆われた好天静穏日の続いた2007年9月26, 27日の2日間である。図3に2007年9月26日午前9時の地上天気図を示す。

移動型観測では、前述の測定器を自転車の前部、地上高約1.5mの位置に取り付けた(図4)。さらに、観測中の測定位置を知るためにGPS(POKE・NAVI FG-530; EMPEX社)を自転車の前カゴ部分に設置

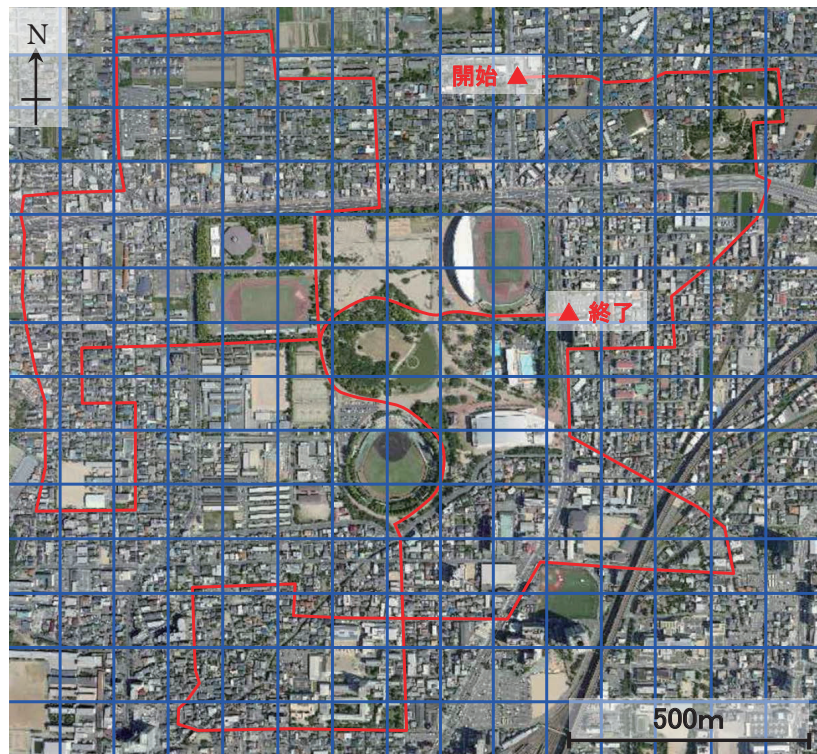


図5. 移動型観測のルートと100m間隔の分割図.

した。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公園を中心とする1km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(図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よう調整した。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100m間隔で格子状に分割し(図5)、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7地点選定し(図1中の◎を参照)、自転車で通過する際に一時停止して測定した。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、にじみ出し現象は気温

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, 重田ほか 2013)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。

3. 気温の器差補正と時刻補正

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。アスマン式通風乾湿計SK-RHG(佐藤計量機器製作所; 気象庁検定付き)の測定値をもとに校正済みの自作測定器1台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 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 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。

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者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。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。

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

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)、 ΔT_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)、 d_{ki} 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。

4. 天空率と緑被率の算出方法

天空率は、任意の地表の点から空の見える部分を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 CanopOn 2 (<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)。ここでは、重田ほか(2013)と同様の方法で緑被率を算出する。本研究では、約100mの間隔で定点型観測の地点を設けている。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。緑被率の算出には、国土地理院が公開している2007年の航空写真を参考にして、測定地点を中心に100mの範囲を10m間隔の格子で分割し、格子内の半分以

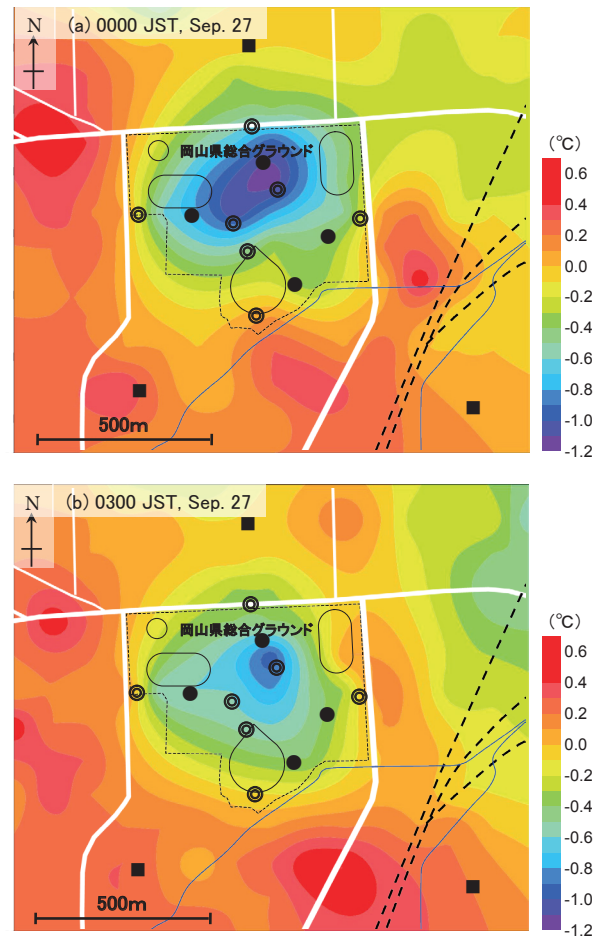


図6. 地上気温の偏差分布。2007年9月27日(a)0時、(b)3時。

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100個中に含まれる緑地数を求め、その割合を緑被率とした。

III. 結果

1. 地上気温

岡山県総合グラウンドのクールアイランド現象を把握するため、公園から南へ約1.5kmの距離にある岡山地方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。その結果、2007年9月19, 20, 22, 26, 27日の計5日間が典型的な好天静穏日として抽出された。しかし、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、岡山地方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、クールアイランド強度に対する議論をより厳密にした。ここでは、日照

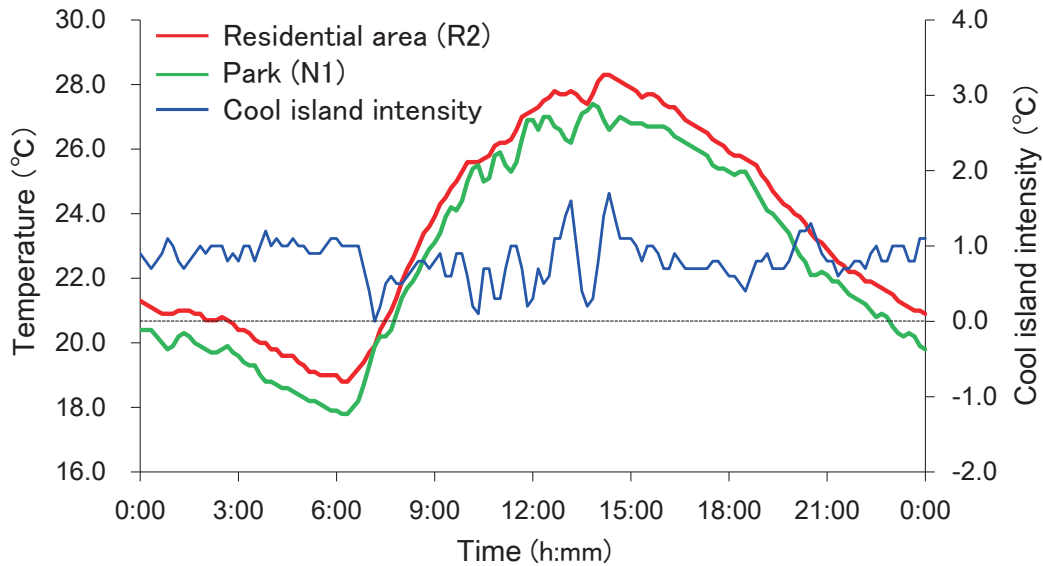


図7. 気温とクールアイランド強度の時間変化(2007年9月26日0～24時). 気温は住宅街区(R2)と公園(N1)をそれぞれ示す.

時間が最も多い9月26日(10.8時間)～27日(8.3時間)を対象に解析していくことにする. 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9月27日0時と3時における地上気温偏差の水平分布を図6に示す. なお, 本研究で水平分布図を描く際の内挿方法には, Kriging法を用いることにする. 観測期間中の夜間は, 公園が周辺の住宅街に比べて低温な環境になる「クールアイランド現象」が認められた. 低温な領域は, 緑地帯を中心に広がっており, 隣接する住宅街との気温差(クールアイランド強度)は1.0～1.5°Cであった. しかしながら, その低温領域は公園内に限られており, 周辺の住宅街へはあまり広がっていないようである.

次に, この気温差の時間変化を把握するため, 定点型観測で得られた気温を用いてクールアイランド強度を算出する. その気温差を算出するには基準となる観測地点について細心の注意を払う必要がある. 特に住宅街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る,

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, 住宅街の気温には公園の南側に位置するR2の地点とした(図1中の■を参照). R2の土地被覆形態は住宅街区であり, 境界部(公園)からの距離は340mである. 一方, 公園の気温には天空率が

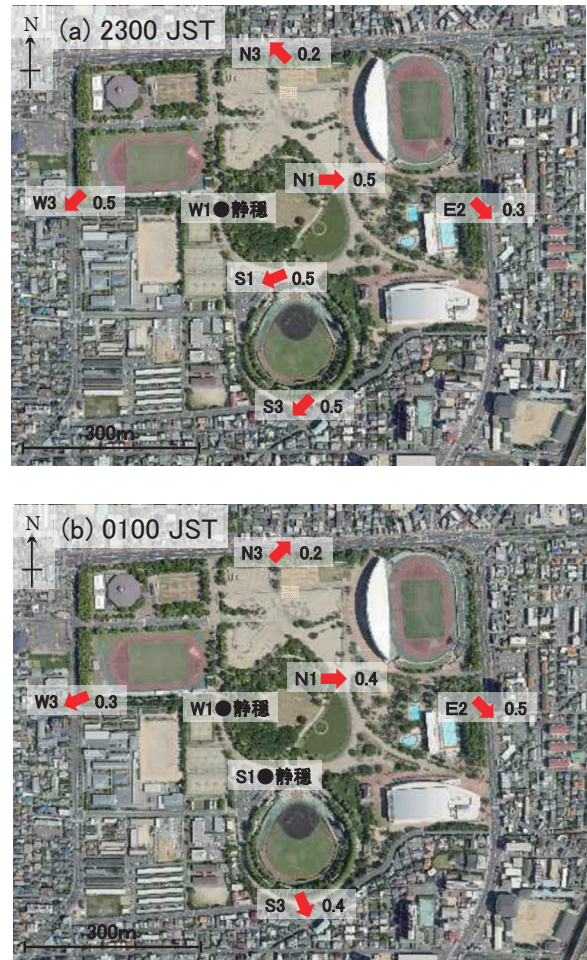


図8. 平均風向と平均風速(m/s). 2007年9月26日(a)23時と(b)翌日1時, 数値は風速を表す.

0.77ならびに緑被率が48.5%と高く、緑地帯のほぼ中央に位置するN1とした(図1中の◎を参照)。この気温差(住宅街の気温から公園の気温を差し引いたもの)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、昼夜を問わず約1°C(最大+1.7°C)のほぼ定常状態で推移しており、その値が負になることはなかった(図7)。これは、公園内の気温が周辺の住宅街の気温よりも常に低いことを意味している。

成田ほか(2004)の新宿御苑を対象とした研究では、クールアイランド強度が最大+3.0°Cになると述べている。また、重田ほか(2013)は、大阪城公園で観測されたクールアイランド強度は午前4~5時頃に+2.0°C以上の最大値を記録したと報告している。したがって、岡山県総合グラウンドで観測されたクールアイランド強度は既往研究で示された値よりも小さいことがわかる。これは、岡山県総合グラウンド周辺の土地利用形態が新宿御苑や大阪城公園のような都市域ではなく、比較的 sky view factor の大きい住宅街であることに起因すると予想される。このように、クールアイランド強度の最大値やその記録される時間帯は、公園や周辺街区の土地利用形態によって大きく異なる。

2. 風向・風速

各観測地点における9月26日23時と27日1時の風向・風速を図8に示す。既往研究の結果を参考に、本研究では公園から住宅街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。風向は23時・1時ともに公園の縁辺部では公園内から周辺の住宅街へ向けて放射状に流出する風が認められた。一方、公園の中心部に近いW1の地点(図1中の◎を参照)では、ほとんど風が観測されなかった。このように、岡山県総合グラウンドでは、にじみ出し現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明らかとなった。

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

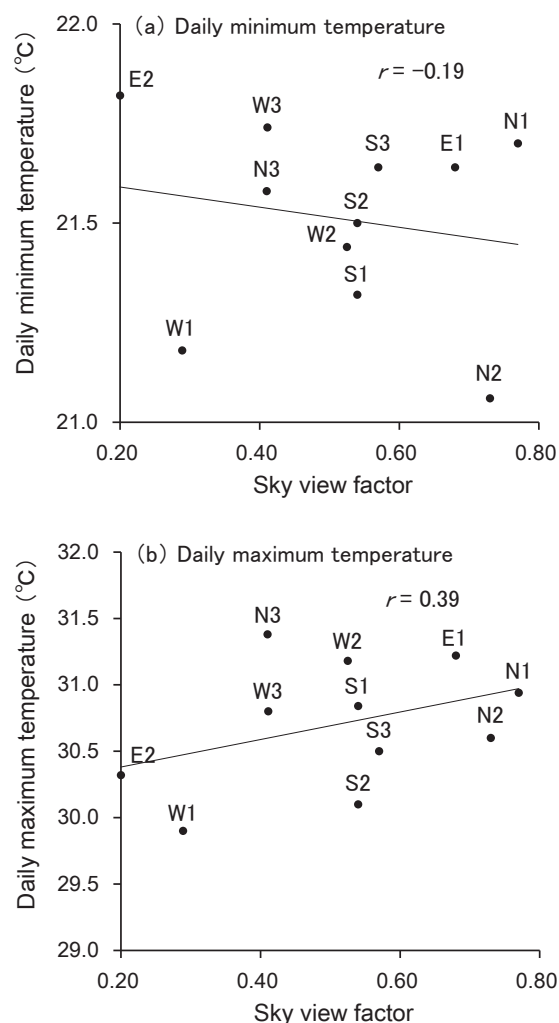


図9. 天空率と(a)日最低気温, (b)日最高気温の相関。

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(2007年9月19, 20, 22, 26, 27日)に対して同一時刻ごとにアンサンブル平均した日最低気温と日最高気温である。

天空率と日最低気温・日最高気温の相関を図9に、緑被率と日最低気温・日最高気温の関係を図10にそれぞれ示す。各相関分析の結果、天空率と日最低気温・日最高気温、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有意水準10%で有意な正の相関($r = +0.53$; 最大で+0.69)が認められた(図10a)。しかし、この相関係数は重田ほか(2013)によって報告されている大阪城公園で得られた相関係数($r = +0.96$)よりもかなり小さい。

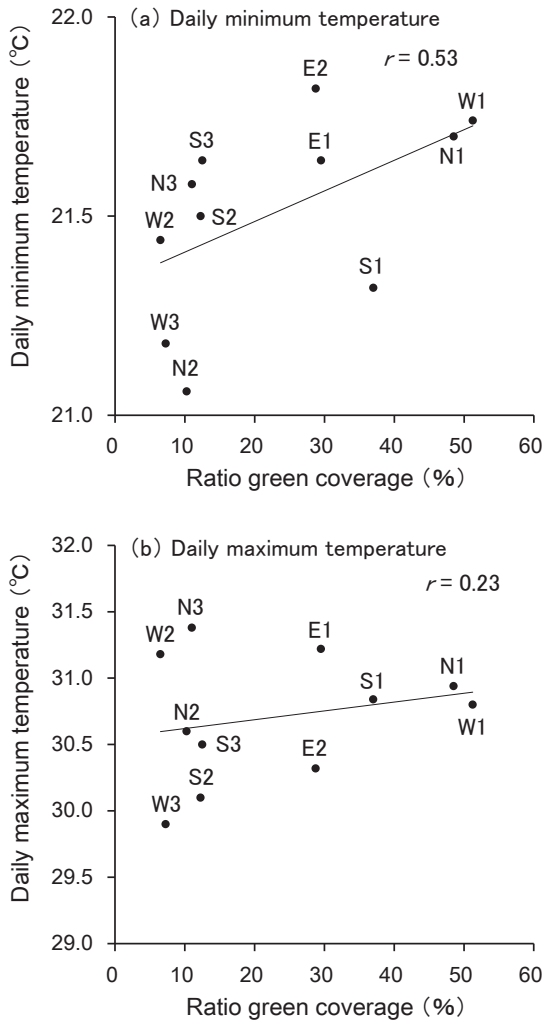


図10. 緑被率と(a)日最低気温, (b)日最高気温の相関.

IV. 考察

1. クールアイランド発生時の表面温度

クールアイランド現象発生時の表面温度を測定するため、ヘリコプターによる表面温度の測定を2008年8月7日に実施した。測定時間は、日中のクールアイランドが出現していると予想される12時頃におこなった。熱赤外カメラ (TH7102 ; NEC三栄社製) を四国航空(株)所有のヘリコプターAS350B3機に搭載し、岡山県総合グラウンドおよびその周辺を対象に高度約800mから10秒毎に表面放射温度を連続撮影した。熱赤外面像の空間分解能は約1.3mであり、画像1枚は南北約310m, 東西約410mの撮影範囲である。そのため、解析の際には撮影された熱赤外面像を合成した。

その結果、2008年8月7日は天候に恵まれ、雲も

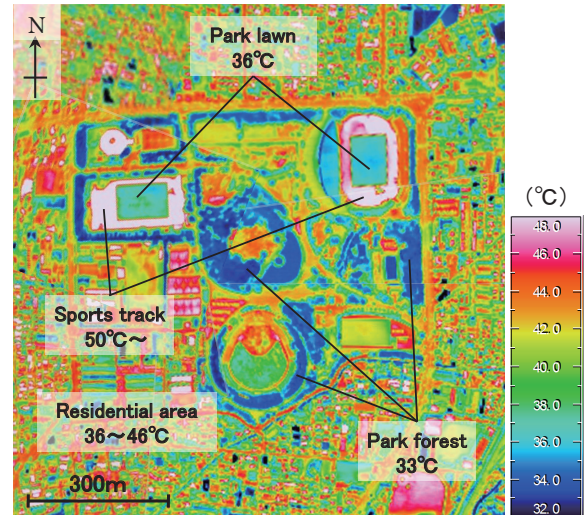


図11. 岡山県総合グラウンドの表面温度(2008年8月7日12:00).

ほとんど存在せず鮮明な画像を取得することができた。岡山県総合グラウンドとその周辺地域における表面温度を図11に示す。公園内で表面温度が高い土地被覆形態は、スポーツトラックであり50°C以上である。逆に、表面温度が低い場所は緑地帯(樹林地)であり、約33°Cである。両者の温度差は約20°Cにも及んでおり、その温度差は熱容量の差に起因しているものと推測される。一方、周辺の住宅街では、建物による日陰の影響や畑など様々な土地被覆形態が混在しているため、36~46°Cと表面温度にばらつきが認められ、公園内の緑地帯よりも3°C以上高くなっていた。この場合、地表面から大気へ輸送される顕熱は、表面温度が高い住宅街区のほうが緑地帯よりも必然的に多くなる。そのため、住宅街の気温は緑地帯よりも上昇しやすくなる。しかし、日中は夜間に比べて風も強く、乱流混合層がよく発達し、風も強いいため、緑地と低温域の水平分布は一致しづらくなると考えられる。

2. 天空率・緑被率と夜間の大気冷却量の関係

ここでは、重田ほか(2013)と同様の方法で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 AT は式(2)から求めた。

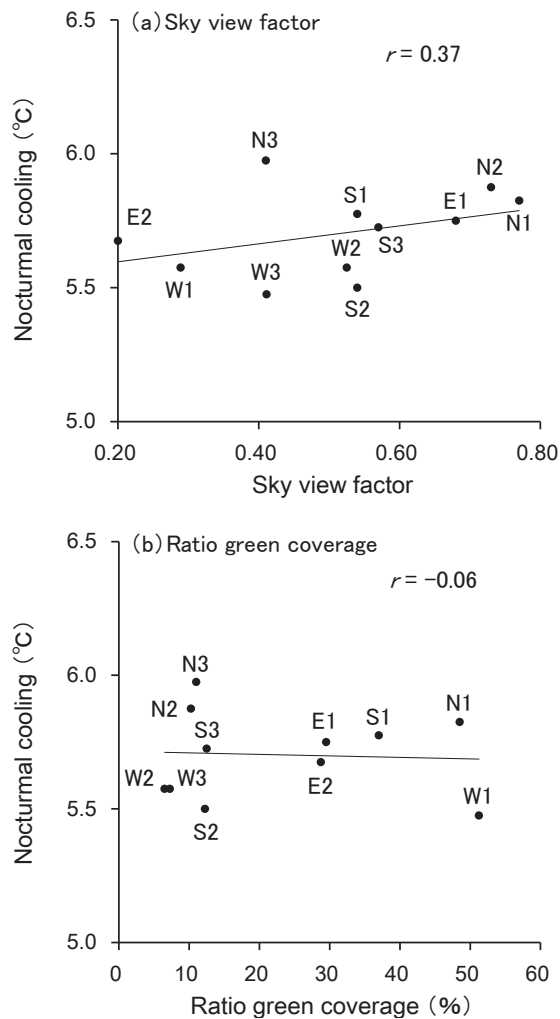


図12. 大気冷却量と(a)天空率, (b)緑被率の相関.

$$\Delta T = T_d - T_m \quad (2)$$

T_d は日没前18時の気温, T_m は翌朝9時までに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・緑被率の関係を図12に示す. 相関分析の結果, 夜間の大気冷却量と天空率, 緑被率のあいだには有意な相関は認められなかった(図12). 重田ほか(2013)の報告によると大阪城公園では, 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ものの, 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($r = +0.67$)が認められている. したがって, 岡山県総合グラウンドで得られた結果は大阪城公園の報告とは異なっていた. つまり, 大気冷却量と緑被率の関係は, 緑地帯の規模や周辺環境によって異なるようである.

V. まとめ

2007年9月19~28日にかけて住宅街に囲まれている岡山県総合グラウンドを対象に気象観測をおこなった. その結果, 岡山県総合グラウンドでは, 昼夜を問わず好天静穏日であれば明瞭なクールアイランドが出現することが明らかとなった. その低温な領域は, 緑地帯を中心に広がっており, クールアイランド強度は $1.0 \sim 1.5^\circ\text{C}$ であった. しかしながら, その低温な範囲は公園内に限られており, 周辺の住宅街へはあまり広がっていなかった.

一方, 風向・風速を観測した結果, 公園の縁辺部では夜間に公園内から周辺の住宅街へ向けて放射状に流出するにじみ出し現象が認められた. 2008年8月7日にヘリコプターによる表面温度を測定した結果, 住宅街の表面温度はばらつきがあるものの, 緑地帯との温度差は 5°C 以上であることが明らかとなった. 各相関分析の結果, 緑被率と日最低気温には有意水準10%で有意な正の相関($r = +0.53$; 最大で $+0.69$)が認められた. しかし, この相関係数は重田ほか(2013)によって報告されている大阪城公園で得られた値($r = +0.96$)よりもかなり小さかった.

謝辞

定点型観測点の設置にご協力して頂きました岡山市公園緑地課の方々にご心よりお礼申し上げます. また, 表面温度の測定には, (財)八雲環境科学振興財団「平成20年度環境研究助成」の援助を受けたことを記して謝意を表します.

引用文献

- Eliasson, I, Upmanis, H (2000). Nocturnal Airflow from Urban Parks-Implications for City Ventilation. *Theor. Appl. Climatol*, 66: 95-107.
- Honjo, T., Narita, K., Sugawara, H., Mikami, T., Kimura, K., Kuwata, N. (2003). Observation of cool island effect in urban park (Shinjuku Gyoen). *Fifth International Conference on Urban Climate*, 2: 261-264.
- 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.
- 森山正和(2004). ヒートアイランドの対策と技術. 学芸出版社. 60-68.
- 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.
- 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・高岡利行・大橋唯太・亀卦川幸浩・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・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: 393-404.
- 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 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CanopOn 2: <http://takenaka-akio.org/etc/canopon2/>.

(2014年1月6日受理)