

自然教育園における冷気のにじみ出し現象 — 2011年夏季の観測結果 —

清水昭吾¹・菅原広史²・成田健一³・三上岳彦⁴・萩原信介⁵

Cold air-seeping phenomena in the Institute for Nature Study
— Results of the 2011 summer observations —

Shogo Shimizu¹, Hirofumi Sugawara², Ken-ichi Narita³,
Takehiko Mikami⁴ and Shinsuke Hagiwara⁵

はじめに

都市内に存在する緑地には、都市のヒートアイランドを緩和する効果が期待されている。緑地内は周辺市街地よりも数℃低温となり、緑地内の低温な空気は緑地の外へと流出して周囲の気温を下げる事が、これまで様々な緑地での観測結果から確認されている。緑地内冷気の周辺市街地への流出には、一般風による移流と、静穏な夜間に緑地内の冷気が重力流の作用により周囲へと流出する「にじみ出し現象」がある。にじみ出し現象に関しては、新宿御苑での一連の観測（例えば成田ほか、2004；永谷ほか、2007）などによって実測例があるものの、にじみ出し現象の詳細を直接的かつ明確にとらえた事例報告は多くない（成田・菅原、2011）。

そこで、自然教育園では夏季を中心としてにじみ出し現象の詳細を明らかにするための気象観測を2009年から継続して行っている（三上ほか、2010；清水ほか、2011）。本報では、2011年夏季に実施した観測の結果について報告する。

観測概要

自然教育園内および周辺市街地において気象観測を実施した。観測地点の配置を図1に示す。

園内外の気温分布は、自然通風型放射シェルターをつけた温度ロガー（T&D, RTR-52）を用いて1分間隔で測定した（G14～G20のみ10分間隔）。測定高度は地上2.5mを基準とした。2010年の観測との違いは、北側市街地で首都高速の高架下にて測定点を3地点（N10～N12）追加し、一部の地点

¹ 首都大学東京, Tokyo Metropolitan University

² 防衛大学校, National Defense Academy

³ 日本工業大学, Nippon Institute of Technology

⁴ 帝京大学, Teikyo University

⁵ 国立科学博物館附属自然教育園, Institute for Nature Study, National Museum of Nature and Science

で測定を取り止めたほか、新たに南側市街地に測定点 (S1 ~ S3) を設けた点である。園内からの冷気の到達範囲を明らかにするため、市街地の測定点は園の境界から直線上に配置してあり、南側市街地から園内を経て北側市街地へと南北測線を取れるように配慮した。

以上の気温の水平分布に加えて、気温鉛直分布の測定を行った。測定場所は園中央の観測タワーと園の南側および北側の3地点で、測定高度は観測タワーで地上 0.5・1.5・2.5・4.0・6.0・8.0・10.0・

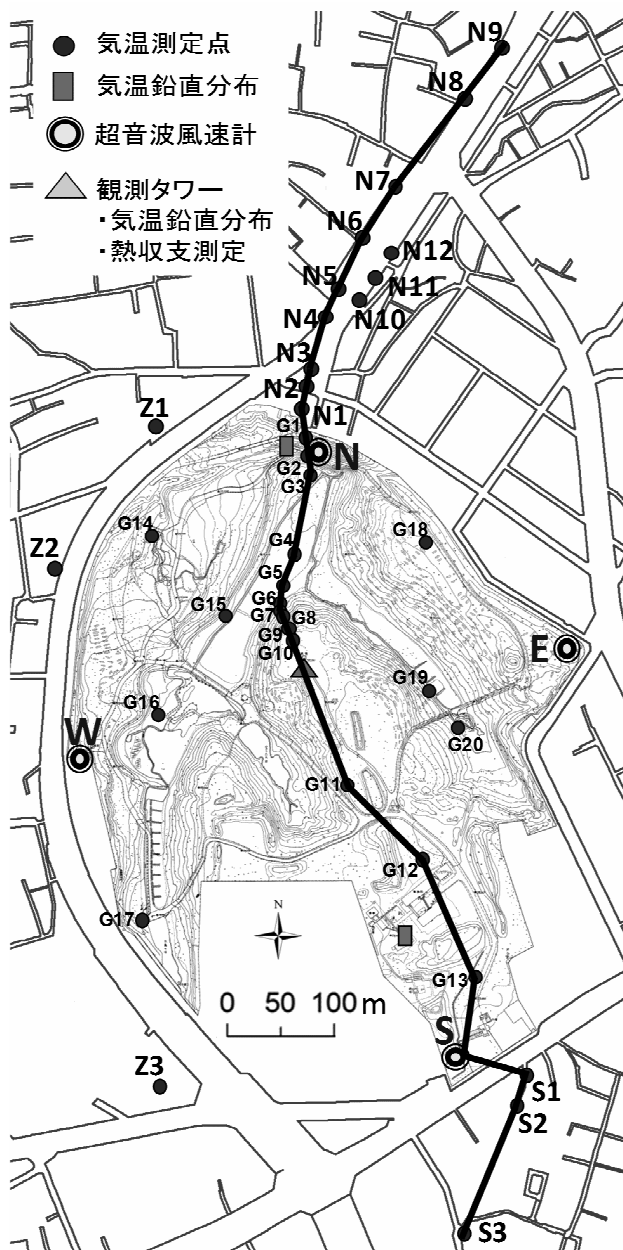


図1 観測地点の配置。太線は気温断面を取る際に使用した南北測線を示す。

11.4・13.4・15.4・17.6m, 北側で地上1.5・3.5・5.5・7.5・9.5・11.5・13.5・15.5・17.5・19.5m, 南側で地上4・6・8・10・12・14・16・18mである。2010年の観測と比べると、北側観測点で測定高度を延長(19.5mは樹冠上)し、南側観測点で場所を移動した。データ記録間隔は1分である。

また、自然教育園から周辺市街地へにじみ出す冷気の流れをとらえるため、園の東西南北の境界付近4箇所で風向・風速の測定を行った。測定高度は、N・E・S地点では地上1.5m, W地点では地上8mで、超音波風速計(Gill windsonic)により1秒ごとの測定値の1分平均値を記録した。

また自然教育園の3か所の飛び地(Z1～Z3)においては、百葉箱内の気温を10分間隔で測定した。さらに市街地気温として、自然教育園周辺(園から1km以内)の小学校3校(E1～E3)の百葉箱内において10分間隔で気温を測定し、園内の気温と比較を行った。

2011年夏季の観測は8月から9月にかけて実施したが、以下では全地点でデータの揃った8月4日18時から9月24日6時にかけての52日分のデータを使用する。

クールアイランド強度(緑地内外気温差)

はじめに、自然教育園内と周辺市街地の気温差を求めた。1地点の局所的な影響を避けるために園内外とも数地点の平均気温を求め、その差を緑地内外気温差(クールアイランド強度)とした。園内平均気温は園中央部の8地点(G6～G11, G15, G19)の平均値、市街地平均気温は周辺小学校3地点の平均値とし、園内の気温から市街地の気温を引いた値がクールアイランド強度である。

図2に観測を行った全期間のクールアイランド強度の時系列を示した。クールアイランド強度は最大で4℃以上であり、園内は常に市街地よりも低温(クールアイランド強度が負の値)であった。観測全期間のクールアイランド強度の平均値は-1.8℃であった。

緑地内では日中に樹木による日射の遮蔽や蒸散作用、夜間に放射冷却によって周辺の市街地よりも低温となる。一般に、晴天日にはクールアイランド強度が大きくなるといわれており、ここでは晴天日と曇雨天日のクールアイランド強度の違いについても検討する。対象期間の晴天日と曇雨天日を抽出し、クールアイランド強度の平均値を算出した。気象庁大手町のデータを使用し、晴天日は1日の日照時間が7時間以上かつ夜間の平均雲量(3時と21時の平均値)が8以下で無降水日と定義し、合計12日が抽出された(8月8日・9日・10日・16日・17日・28日・9月7日・10日・13日・14日・15日・18日)。曇雨天日は日照時間が1時間以下かつ夜間平均雲量が9以上の日とし、9日が抽出された(8月19日・20日・21日・22日・25日・9月1日・20日・21日・23日)。

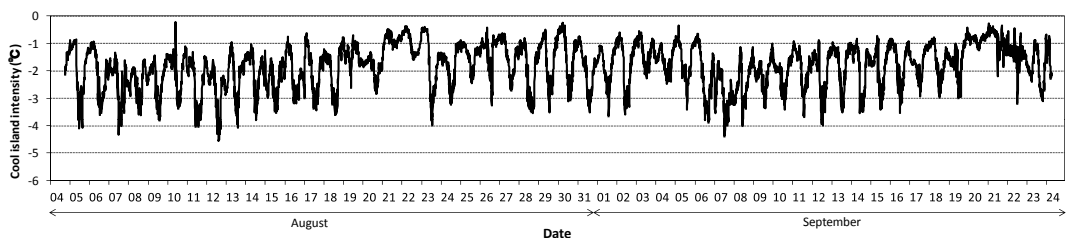


図2 観測全期間のクールアイランド強度の時系列.

図3は、晴天日と曇雨天日でそれぞれ平均した園内平均気温と市街地平均気温、およびクールアイランド強度の日変化を示したものである。晴天日についてみると、市街地では最低気温がおよそ26℃であるのに対し、園内では24℃近くまで気温が下がっている。最高気温は市街地が34℃近くまで上昇するのに対し、園内では30℃程度に抑えられている。園内外の気温差（クールアイランド強度）は夜間よりも日中に大きく、夜間はおよそ1.5℃、日中はおよそ3℃であった。2010年の観測結果（清水ほか, 2011）と比較すると、気温差が日中に0.5℃程度大きく夜間に0.5℃程度小さくなったため、クールアイランド強度の日較差が大きくなる結果となった。今回はクールアイランド強度を求めるための市街地観測点が2010年から変更となっており、クールアイランド強度は気温の測定地点の選択に大きく依存する（菅原ほか, 2006）ため、その絶対値の厳密な議論はできない。しかし、夜間よりも日中に気温差（クールアイランド強度）が大きくなる点は2010年と同様であったことから、晴天日の自然教育園内はその周辺市街地よりも2～3℃程度低温で、特に日中に気温差が大きいということは間違いないようである。曇雨天日にはクールアイランド強度の日変化は小さかったが、園内は市街地よりも1日を通して1℃以上気温が低いことがわかった。人工排熱の有無や地表面被覆の違いなどが、曇雨天日であっても気温差を生んでいると考えられる。

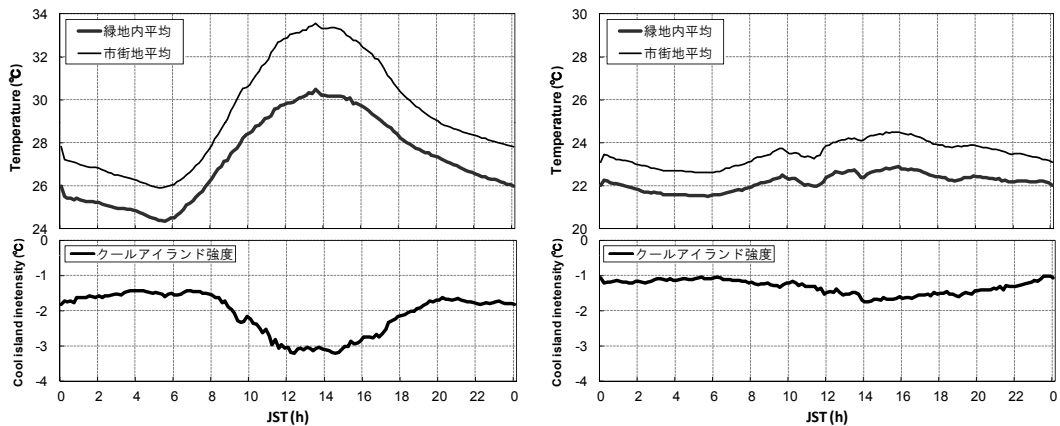


図3 天候別の園内平均気温と市街地平均気温、およびクールアイランド強度の日変化。左：晴天日平均、右：曇雨天日平均。

にじみ出し現象発生夜の気温断面分布

図4は、2011年9月7日18時から8日6時にかけての緑地境界4地点に設置した超音波風速計および温度計による風向・風速・気温の変化である。N地点およびE地点では一夜を通して園内から市街地へと向かう方向の風であり、W地点およびS地点においては夜の早い時間には南寄りの風であったものの21時頃になるとそれぞれ園内から市街地へと向かう風向が卓越するようになる。特に0時から2時頃の間は最も風向が安定していた。また、この時の風速はおよそ0.5m/s以下という微風であり、園内からの谷の流出方向であるN地点では他の地点と比べて風速が若干大きかった。このような現象は2010年の観測でも確認されており、園内の冷気が市街地の全方位へとにじみ出していたことがわかる。

この日の自然教育園を横切る南北測線に沿った気温断面分布をみると（図5）、18時には湿地のG4の低温が顕著でこの場所で冷気が溜まり始めている。また、G10にかけて斜面に沿って気温が高くなっており、北側境界付近と市街地では気温差が大きい。22時になると、北側市街地の自然教育園に近い地点で気温が低下している。自然教育園に近づくほど気温が低下するという分布となっており、自然教育園からののにじみ出しの冷気が北側市街地の気温を下げたと考えられる。のにじみ出しによる冷気流出が進んだ2時には、北側市街地でさらに冷気の影響が及んでおり、園内との気温差が小さくな

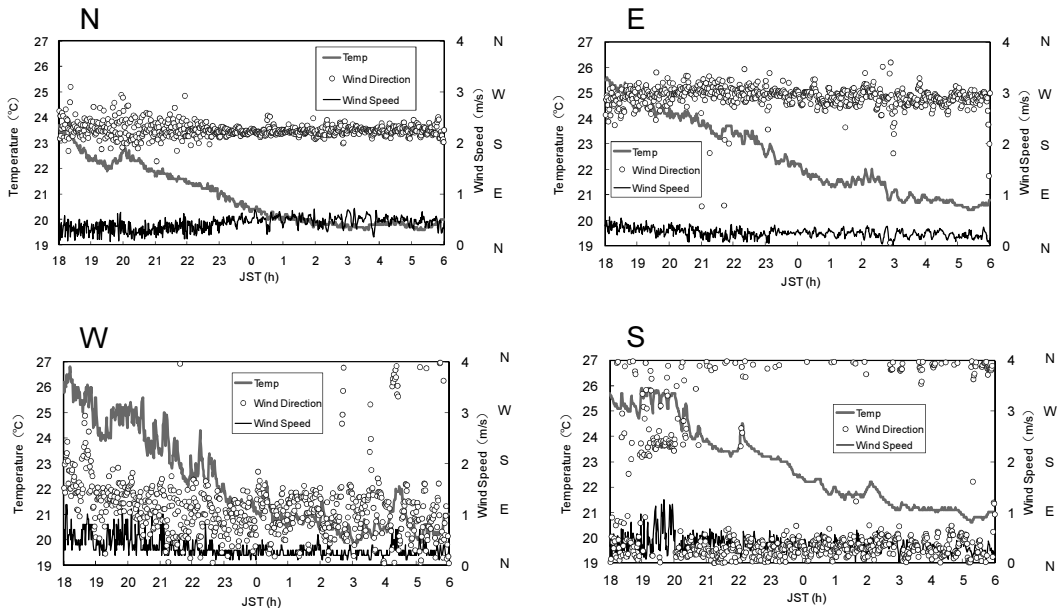


図4 2011年9月7日18時～8日6時の緑地境界における気温・風向・風速の変化。

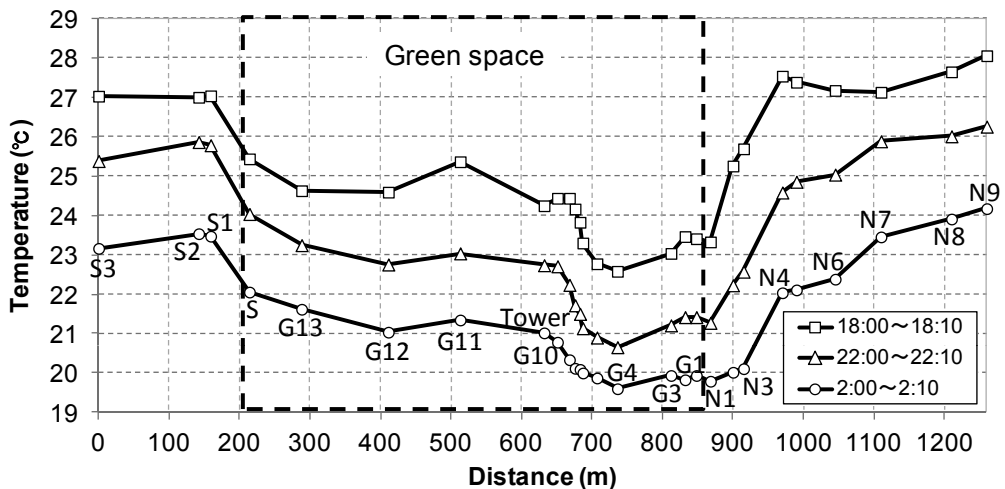


図5 にじみ出し発生夜の南北測線に沿った気温断面分布。各地点の値は10分間平均気温で9月7日18時から8日2時まで4時間ごとに示した。

っている。特に N3 付近までは園内と同程度の低温である。また、標高差のある湿地 (G4) とタワー付近の気温差も小さくなっており、湿地付近に溜まっていた冷気が厚みを増したと思われる。なお南側市街地は、北側市街地のような自然教育園の近くで非常に低温となる現象はみられない。この要因としては、自然教育園を出てすぐに交通量の多い目黒通りが存在することや、北側市街地のように地形的に市街地に向かって下っていく方向ではないことが考えられる。

にじみ出し現象発生夜の市街地の気温変化と緑地内冷気の到達範囲

にじみ出し現象の発生した9月7日18時から8日6時にかけての周辺市街地における気温変化を示したのが図6である。園内からの冷気の影響を受けない周辺の小学校の気温変化もあわせて示してある。

北側市街地では自然教育園に最も近い N1 が18時に最も低温で、時間の経過とともに N2・N3 においても園内からの冷気の影響を受けて気温が下がっていく様子がわかる。外苑西通りを越えた N4 から N6 では22時以降に周辺小学校の変化とは明らかに異なる気温低下がみられることから、この地点まで園内からの冷気が到達して気温が下がったものと考えられる。N8 や N9 の気温は周辺小学校よりも一夜を通して高く冷気の到達はなかったと思われるが、N7 では23時頃にはっきりとした気温低下がみられる。N7 の23時以降の気温は周辺小学校よりも必ずしも低くはなかったが、N4 から N6 の気温変化とよく似た変動をしていることから、N7 においても園内からの冷気の到達が示唆される。この地点の自然教育園からの距離は約260mで、2010年の観測においてもこの場所まで冷気が到達したという結果を示した。

ただし、ここで1つ考慮すべき点は、N5 から N7 にかけては外苑西通りの側道となっており本道との間に緑地帯が存在していることである。N5 から N7 にかけての気温低下はこの緑地帯で作られた冷気によるものという可能性はないだろうか。この点について明らかにするため、2011年の観測で新たに設置した本道側の首都高速高架下の3地点の気温変化について検討する。もし高架下でも気温低下がみられれば、これは園内からの冷気の影響と考えられる。高架下3地点の気温変化をみると(図6中段)、夜の初めは自動車からの排熱などの影響を受けて周辺小学校よりも高温であるが、N2 や N3 で気温が下がり始めた22時頃になると特に園に近い N10 の地点での低温が顕著になる。他の2地点は N10 のようにはっきりとは現れていないものの、N10 と同時の気温低下がみられることや自然教育園に近い N11 の方が N12 よりも低温であったことも考慮すると、高架下のこの付近にまで自然教育園からのにじみ出しによる冷気が到達している可能性が高い。よって N7 付近までみられる気温低下は、自然教育園からのにじみ出しによる冷気の影響と考えるのが妥当であろう。

続いて、南側市街地の気温変化についても検討する(図6下段)。23時頃までは周辺小学校よりも気温が高いが、にじみ出しが進行した23時以降には逆に周辺小学校よりも低くなっていた。間欠的に自然教育園に近い S1 と S2 で0.5℃程度の気温低下がみられており、これはにじみ出しによる冷気が到達した結果と考えられる。ただし、S3 まで冷気が到達していたかどうかについては、今回の結果からははっきりとわからなかった。

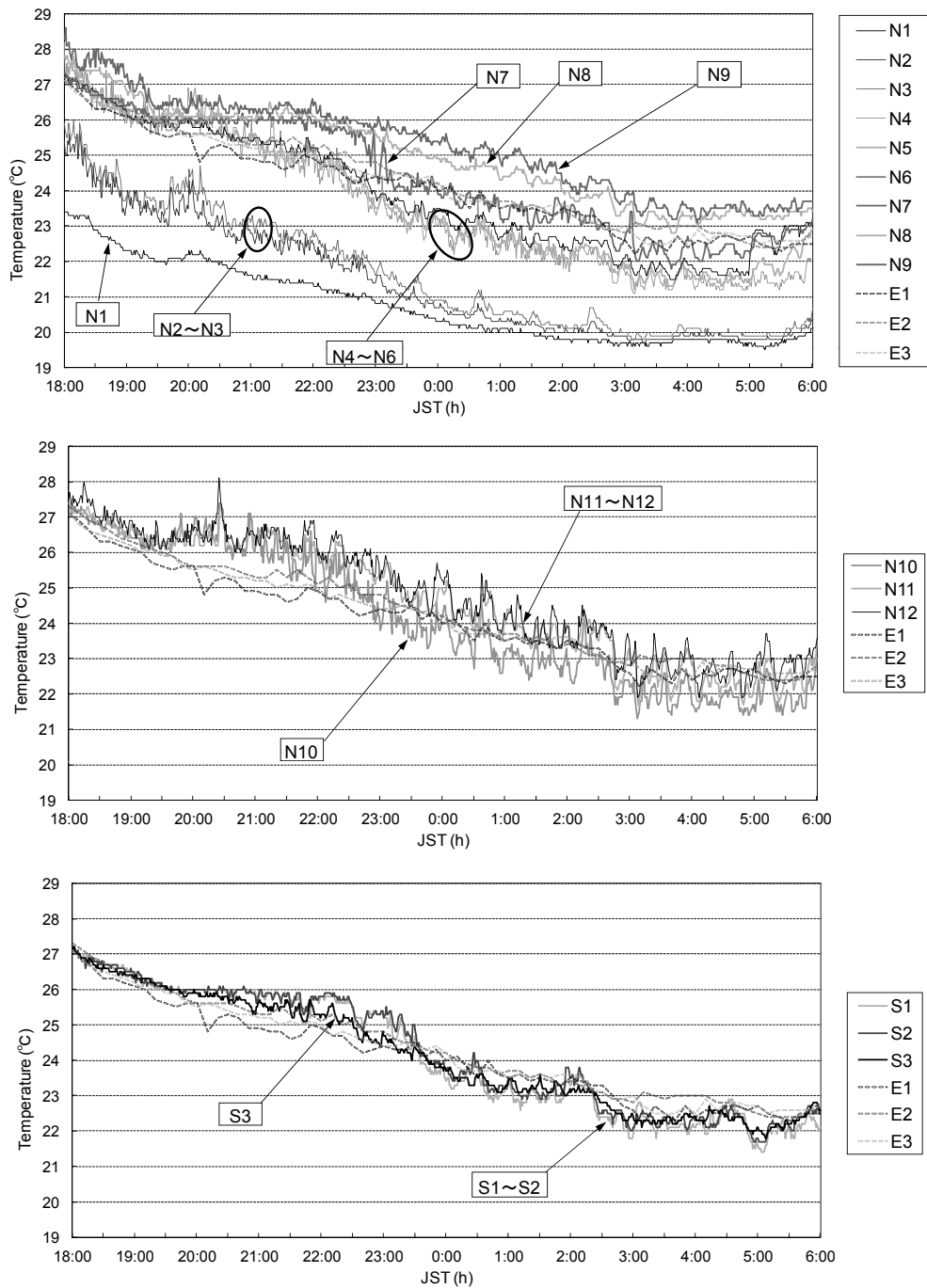


図6 にじみ出し発生夜の周辺市街地各点における気温時間変化(9月7日18時~8日6時)。上段：北側市街地，中段：首都高速高架下(北側市街地)，下段：南側市街地。周辺小学校の気温変化もあわせて示した。

にじみ出し現象発生夜の気温鉛直分布の変化

図7は、9月7日18時から8日4時にかけての園内3か所で測定された気温鉛直分布の変化である。観測タワーの分布に関しては、タワー北側斜面沿いの標高の異なる地点の気温分布とタワーの鉛直分布をあわせて示している。また、タワーと北側観測点においては樹冠上までの鉛直分布を測定している。

タワーおよび斜面沿いの気温鉛直分布をみると、18時から22時にかけては標高の低い湿地やタワー下の地表面付近で低温であるが、0時を過ぎると樹冠付近の低温が目立つようになり湿地から樹冠付近にかけての気温差が小さくなっていった。22時から0時にかけてはタワーの樹冠より下で気温低下が大きく、この時間帯に園内の樹冠下で冷気を溜め込み、その後園内の冷気が市街地へと流出したことが考えられる。これは、0時以降に各境界で風向が安定してにじみ出しが顕著であったことから示唆される。園北側の気温鉛直分布の変化に注目すると、夜の初めには地上から6m（標高28m）付近において高温でそれより高度の高い場所では等温という分布であった。この時の冷気の厚さは6m程度といえるが、徐々に6m付近の高温はみられなくなり、4時には地上から樹冠付近にかけてほとんど直線的に気温が高くなっていくという分布となった。よって、時間の経過とともに冷気の厚みが増していき、最終的には樹冠付近（高さ16m程度）にまで達したと考えられる。園南側の気温鉛直分布は、最初は上下の気温差が小さいものの時間の経過とともに地上に近いほど気温が低くなるという変化をしており、地上付近から冷気が溜まっていったことを反映すると考えられる気温分布であった。

これらのことから考えて、園内で作られた冷気は少なくとも園内樹木の樹高程度（15m前後）の厚さを持っており、園北側の谷を埋めるような形で北側市街地へと流出していったと思われる。

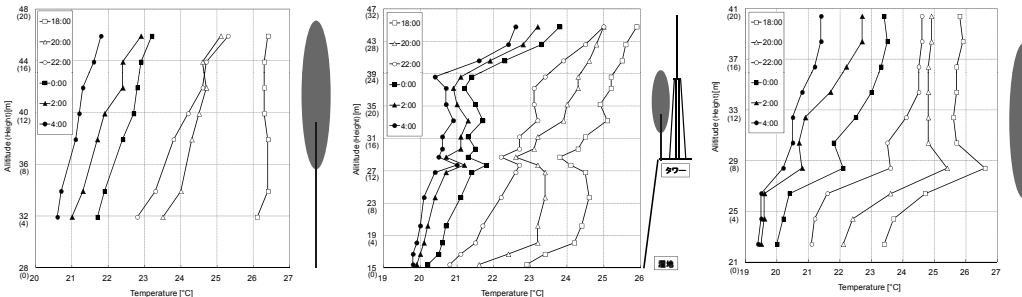


図7 にじみ出し発生夜の気温鉛直分布. 左：南側鉛直観測点（地上高6mは欠測）、中：タワーおよび斜面沿い、右：北側鉛直観測点. 9月7日18時から8日4時の分布を2時間毎に示した.

ま と め

自然教育園からの冷気のにじみ出し現象の詳細を明らかにするための気象観測を2010年に引き続き、2011年夏季にも行った。晴天日の自然教育園内はその周辺市街地よりも2～3℃程度低温で、特に日中に気温差が大きかった。また曇雨天日にも園内は市街地よりも1日を通して1℃以上気温が低かった。冷気のにじみ出し発生夜には、園内から市街地の全方位へと向かう風速0.5m/s以下の微風

が測定され、自然教育園で発生した冷気は、地形的に冷気の流出しやすい北側市街地で自然教育園から260m程度の距離まで到達していたと考えられた。一方、自然教育園の南側市街地では、北側市街地と比べると明瞭な冷気の到達は確認できなかった。地形の違いや交通量の多い道路の存在によって緑地からのにじみ出し現象による冷気の到達範囲が変わってくるのがわかった。また気温の鉛直分布の測定から、にじみ出し現象発生夜に園内で冷気が蓄積されていく過程や、園内で作られた冷気が少なくとも園内樹木の樹高程度の厚さを持っていたことが明らかになった。

引用文献

- 三上岳彦・菅原広史・成田健一・清水昭吾・萩原信介．2010．自然教育園におけるクールアイランド．自然教育園報告，41：85-94．
- 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冷気のにじみ出し現象．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，120：411-425．
- 清水昭吾・菅原広史・成田健一・三上岳彦・萩原信介．2011．自然教育園における冷気のにじみ出し現象．自然教育園報告，42：39-47．
- 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．