

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

成田健一*・三上岳彦**・菅原広史***・本條 毅****・木村圭司*****・桑田直也*****

(*日本工業大学・**東京都立大学・***防衛大学・****千葉大学・*****北海道大学・*****日産自動車)

新宿御苑を対象に夜間の冷気の「にじみ出し現象」の把握を主眼とした微気象観測を夏季約7日間連続して行った。緑地の境界に多数の超音波風速温度計を配置し、気流の直接測定から「にじみ出し現象」の把握を試みた。その結果、晴天かつ静穏な夜間、全地点でほぼ同時に緑地から流出する方向への風向の変化と約1°Cの急激な気温低下が観測された。にじみ出しの平均風速は0.1~0.3 m/sで、にじみ出し出現時にはクールアイランド強度が大きくなる。このときの気温断面分布には流出した冷気の先端に明確なクリフが現れ、その位置は緑地境界から80~90 mであった。このような夜間の冷気の生成に寄与しているのは樹林地よりも芝生面で、芝生面は表面温度も樹冠より低い。芝生面の顕熱流束は夜間負となるが、にじみ出し出現夜はほぼゼロとなる。すなわち、クールアイランド強度の大小と大気を冷却する効果の大小は、別のものと考えるのが妥当である。

キーワード：都市気候、緑地、冷気、熱収支、放射冷却

I はじめに

ヒートアイランドの対策として、都市内緑地の熱環境緩和効果が期待されている。

都市気候の観点から気温分布に及ぼす緑地の効果を扱った研究は、福井(1956)まで溯る。福井(1956)は、気温と測定地点周辺の土地利用の重回帰分析を行い、緑地には気温低減効果があるとしたもので、同様の手法で緑地面積率と気温の関係が山田らによって日本各地の都市で検討されている(山田・丸田 1989, 1991, 1992; 山田ほか 1992, 山田 1993)。これらの統計的解析は、都市計画的な観点からは非常に有用な知見を与えるが、気温の空間代表性が風速や大気安定度など種々の要因によって変化することを考慮すると、その物理的解釈には限界がある。このほか、緑の微気象的影響に関しては、樹木単体(たとえば、近藤ほか 1983; 藤崎・半田 1994)、街路樹(たとえば、境田・鈴木 1994)、公園緑地(たとえば、神田ほか 1991; 清田ほか 1993; 森山ほか 2001)など、さまざまなスケールで数多くの実測研究がなされてきた。しかしながら、数日程度の短期間の測定結果を考察した報告も多く、条件による差

異や物理的メカニズムなど、緑地の効果を客観的に記述するには必ずしも十分とはいえない状況にある。

緑地の微気象的效果といわれる現象の中で、緑地から周辺市街地に冷気が拡がる「にじみ出し現象」の存在を最初に指摘したのは丸田(1972)である。彼は小石川植物園や新宿御苑での温湿度分布の観測から、静穏な夜間や早朝、気温差に起因した公園緑地から周辺市街地への空气の流出が明確に把握されたとした。また、このような現象は規模が小さい錦糸公園や隅田公園では認められないとも報告している。一方、日中に関しては、周辺市街地に及ぼす範囲と程度は天気および風の状態により大きく左右され、強風時には一層、公園緑地内の空气は周辺市街地へ流出すること、また逆に市街地上の空气も公園緑地内に移入してくることが多いと報告している。

丸田の報告は、緑地が持つ熱環境緩和効果に関していくつかの着眼点を提供したが、そのうち緑地の規模との関係については、神田ほか(1991)、Saito et al. (1991)、Katayama et al. (1993)や尹ほか(1998)の実測などで検討がなされ、気温低下の割合は緑地の規模にほぼ比例すると結論されている。一方、緑地と市街地との境界部分の気温分布形状に

関しては、本條ほか（1998）が詳細な実測を繰り返して行い、(a) 緑地から市街地に向かって微風が吹く場合には漸時変化、(b) 風のない状態では急激な温度変化、(c) 市街地の暖気が緑地内へ入り込む分布、の三つのパターンが存在することを明らかにしている。隣接する市街地からの暖気の流入は、成田・清田（1998）でも報告されている。このような境界部の温度分布や緑地の影響範囲を数値シミュレーションで検討する試みも、福本ほか（1988）、神田・日野（1989）、本條・高倉（2000a, b）などによって行われている。また前述の本條ほか（1998）では、同時に長期観測の結果も報告しており、緑地内外の温度差は夜間で風速が小さいときに大きくなる傾向があるとしている。

以上のような気温分布を中心とした研究に対して、リモートセンシングによる緑地の抽出や表面温度解析を試みた研究も数多く行われてきた（たとえば、本條・高倉 1986, 1987; 入江・平野 1995, 1998）。入江・平野（1995）は、表面温度の分布にも「にじみ出し現象」が認められると報告している。

このように丸田が指摘した「にじみ出し現象」は、その後多くの研究者によってその実態把握が試みられてきたが、それらはすべて温度分布から現象の存在を推定したもので、実際に周辺市街地に吹き出す気流をとらえた例は皆無といっても過言ではない。わずかに神田ほか（1997）の明治神宮での観測で、一般風に逆らって周辺域に吹き出す弱風（0.5 m/s 程度）が報告されているが、屋上レベルにおける限られたデータであるため、十分な現象把握には至っていない。

また、にじみ出し現象の正確な把握には緑地内の熱収支の検討が不可欠であるが、信頼できる精度で都市内緑地の熱収支を実測した例は、前述の神田ほか（1997）や本條・高倉（1984）など非常に少ない。一般に、緑地の気温低下の原因は、蒸発散に伴う大きな潜熱フラックスの存在と日傘効果に起因すると

説明される。このことは神田ほか（1997）の実測でも確認されているが、それは日中に限られる現象で夜間は状況が大きく異なる。先に述べたように、緑地内外の気温差は晴天日の静穏な夜間に出現する傾向にあるが、そのような条件下では潜熱フラックスや顕熱フラックスなどの乱流フラックスは非常に小さく、長波放射収支量や伝導による（日中の蓄熱分の）放熱が熱収支において支配的になると考えるのが妥当である。このような観点から Spronken-Smith and Oke（1999）は、放射と伝導フラックスだけを対象としたスケールモデルを用いて、夜間の緑地内外の表面温度差や緑地内部の表面温度分布と天空率（緑地の規模）、構成材料の熱特性などとの関連を実験的に検討している。

以上のような考察を踏まえ、本研究では新宿御苑を対象に夜間の「にじみ出し現象」の把握を主眼とした微気象観測を行った。既往の研究との大きな違いは、緑地の境界に超音波風速温度計を配置し、気流の直接測定から「にじみ出し現象」の把握を試みた点である。さらに、緑地内での熱収支観測を同時に行い冷気の生成メカニズムを把握するとともに、緑地内外の多点における気温の連続観測から、緑地内外温度差と気象条件の関連、ならびに周辺市街地への熱的影響範囲の把握も合わせて検討を試みた。

II 観測概要

新宿御苑（以下、「御苑」と略す）を南北に貫く3本の測線を含め、計88ポイントに日射遮蔽シェルタ（塩ビ製二重円筒、外筒アルミ被覆）に装着した温湿度データロガを設置し、1分間隔で連続測定を行った（図1）。シェルタはファンによる強制通風は行っておらず、自然通風のみである。苑内の地点はすべて樹冠下に設置しており、設置高さは地上約2mとした。地点の選定にあたっては、できるだけグリッド状になるよう配慮した（地点番号は西から東へA～Hの8列、北から南へ1～7とし

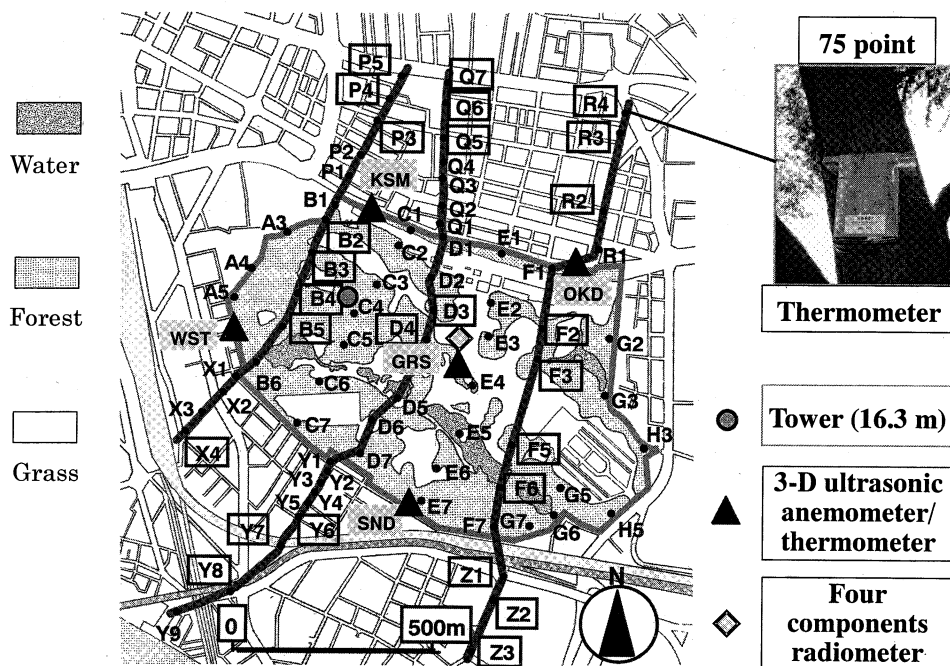


図1 新宿御苑の土地被覆状況の概要と測器の配置

太線の内側が新宿御苑で、図中の凡例は御苑内の地表面被覆状況を示している。なお、四角で囲まれた地点番号は、クールアイランド強度算出のための御苑内および周辺市街地の平均気温を求める際に採用した地点を表している。

Fig.1 Outline of surface types in Shinjuku Gyoen and arrangement of measuring instruments

The boundary of Shinjuku Gyoen is illustrated with a thick line, and each shadow screening shows the type of surface within the park. The measuring points with numbers enclosed by squares in the figure were used to calculate average air temperature in the park and surrounding built-up area.

た)。市街地の地点はできるだけ街路樹を利用し条件が等しくなるよう配慮したが、一部の地点は電柱や街灯のポールを利用している。測線を南北方向としたのは日中の卓越風向である南風を考慮し、風向に沿った気温断面を把握するため、地点番号は北側市街地の3列を西からP・Q・R、南側市街地の3列を西からX・Y・Zとし、御苑に近い地点から順に1から番号を付けた。以上の水平分布に加え、樹林地に設置した高さ16.3mのタワーにも同様の温湿度計13台を取り付け、樹冠上までの鉛直分布を測定した(図1○印)。設置高度は、変化が大きい地表面近くで密、上空ほど粗くなるよう配慮し、地上0.3・0.8・1.3・1.8・2.8・3.8・5.8・7.8・9.8・11.8・13.3・14.8・16.3mとした。

さらに「にじみ出し現象」の把握を目的に、3次元超音波風速温度計5台を緑地の境界と中央の芝生広場に設置し、サンプリング間隔0.1秒で連続測定を行った(図1▲印)。地点KSMのみ20cmスパンのタイプで、ほかの4地点は5cmスパンのプロープを使用した。設置高度は、いずれも地上約1.5mである。なお、温湿度データログについては事前に恒温恒湿槽にて較正を行い、超音波風速温度計の温度目盛は最も近い地点の温湿度データログの値を用いて補正を加えた。さらに、超音波風速温度計を設置した中央の芝生広場(地点GRS)には長短波放射収支計(EKO, MR-40)を設置し、埋設した熱流板と地温測定用の熱電対のデータとともに1分間隔で収録した。観測期間は2000年7月31日～

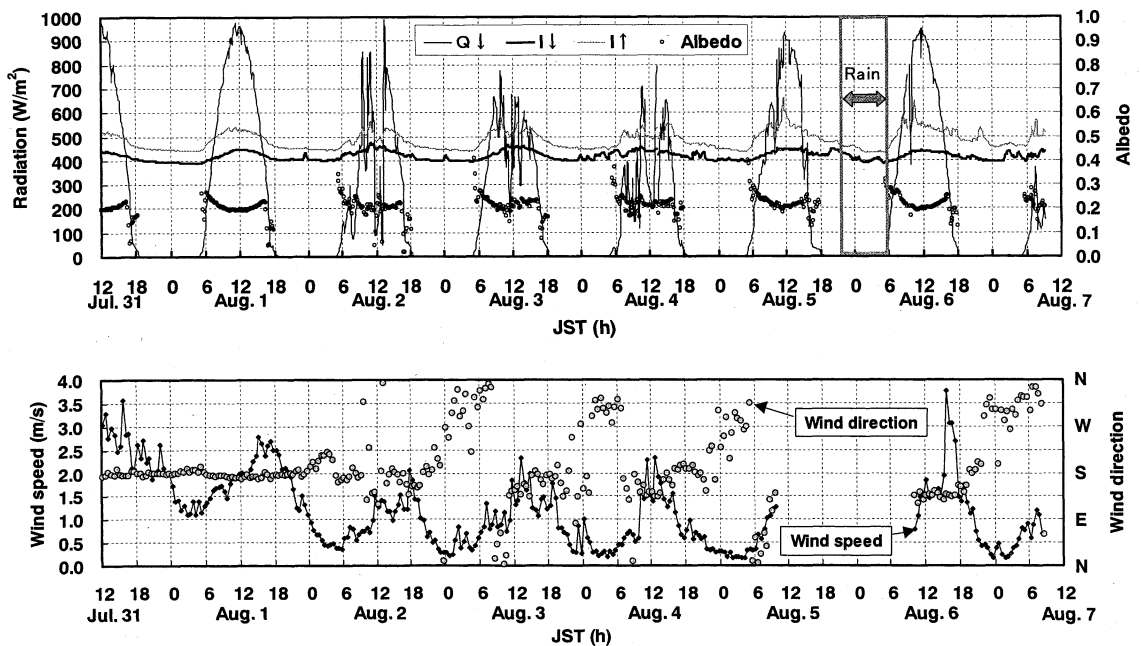


図2 観測期間の日射量 (Q) および長波放射成分 (I) と芝生面におけるアルベド (上段), 風向風速 (下段) の時間変化 (芝生広場定点 GRS)

Fig. 2 Time variations in solar radiation (Q), longwave radiation (I), and albedo (upper), wind speed and direction (lower) on the lawn surface (GRS in Fig. 1) during the observation period

8月7日(ただし温湿度データログのみ8月1日18時スタート)である。

なお以下の解析では、目的とする現象の時間スケールに合わせて、データの平均化時間はそのつど30分、10分、1分などを使い分けている。

III 観測期間の気象概要とクールアイランド強度

図2に、観測期間の気象概要を示す。上段は芝生広場 (GRS) における日射量と上下方向の各長波放射量およびアルベドの変化を10分平均値で表したもので、芝生面のアルベドは日中約0.2で、朝夕はそれより多少増加するという太陽高度依存性が現れている。なお、5日の夜から6日の朝にかけては降雨があった。下段は同じく芝生広場における風向風速の変化を30分平均値で示したもので、日中はおおむね2 m/s 前後の南風が吹いており、夜間は初日を除いて風速が0.5 m/s 以下に弱まっている。

観測期間において、御苑内の気温が周囲の市街地に比べてどの程度低温となっているかを検討するため、まず市街地平均気温と御苑内平均気温を算出した。御苑を貫く3本の測線 (P-B-X, Q-D-Y, R-F-Z) において、IV で述べる気温断面分布を参考に、市街地においては緑地からの冷気の影響、御苑内においては市街地からの暖気の影響を受けていると思われる、境界に近い点を除いて平均値を求めた。図1において、地点記号を四角で囲んだポイントが、平均値の算出に用いた地点である。ここでは、3測線すべてについての市街地と御苑内の平均値を求め、その差をクールアイランド強度と定義した。

図3に、クールアイランド強度の日変化、および市街地平均気温と御苑内平均気温の変化を示す。日中のクールアイランド強度は8月6日を除くとほぼ同様の变化を示しており、正午過ぎに約2°C、朝夕は1°C 程度である。8月6日は特異的に3°C 近い温

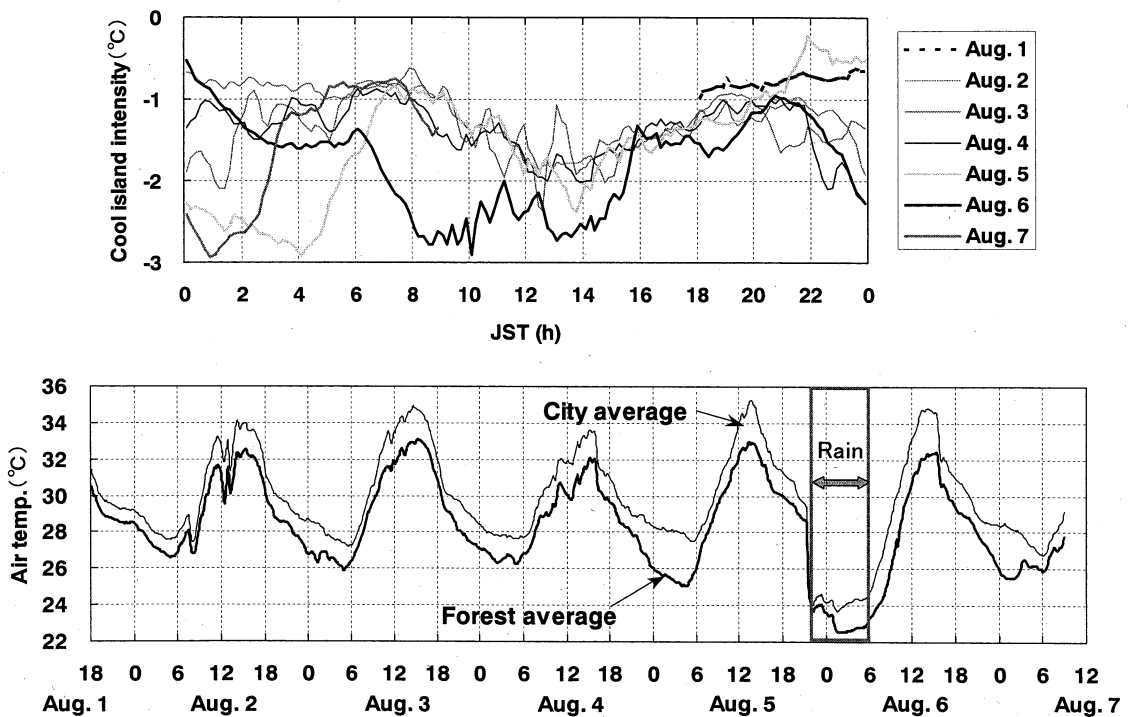


図3 クールアイランド強度の日変化 (上段), および市街地平均気温と緑地平均気温の時間変化 (下段)
 Fig. 3 Diurnal variation in cool-island intensity (upper), time variation of built-up average and park forest average air temperature (lower)

度差が現れているが、これは前日夜から早朝にかけての降雨の影響と思われる。すなわち、降雨後すみやかに乾燥してしまう市街地に対し、御苑内では蒸発散に伴う潜熱交換が持続したためと考えられる。一方、夜間に関しては、深夜から早朝にかけて3°C程度の気温差が何日か現れているが、日によって非常に大きな差異があり、またピークの出現時刻も日によって異なっている。

同じく夏季に明治神宮で測定された結果 (浜田・三上 1994) では、日中のクールアイランド強度が最大6°C近くに及ぶと報告しており、今回の結果はそれに比べると小さい。

IV 気温断面分布と風向による変化

クールアイランド強度は時刻によって大きく変化するため、各時刻の気温分布形状をそのままの形で

は比較できない。そこで、まず各測線の各10分平均値の気温分布に対して先に述べた測線ごとの市街地平均気温と御苑内平均気温を求め、その温度差で基準化した温度比の分布を算出した。

$$\text{温度比} = \frac{(\text{各測定点の気温}) - (\text{御苑内平均気温})}{(\text{市街地平均気温}) - (\text{御苑内平均気温})}$$

すなわち、温度比ゼロが御苑内平均気温、温度比1が市街地平均気温を意味する。このような基準化を行った上で、気象条件ごとに温度比の平均値を求め気温分布形状の差異を考察した。

図4は、南北断面の気温分布を風速別と風向別で比較した一例である。まず風速による分布形状の変化を検討するため、各風向について風速ランク別の比較を試みた (図4上段、南風の場合)。しかしながら、今回の風速域では風速ランクによる分布形状

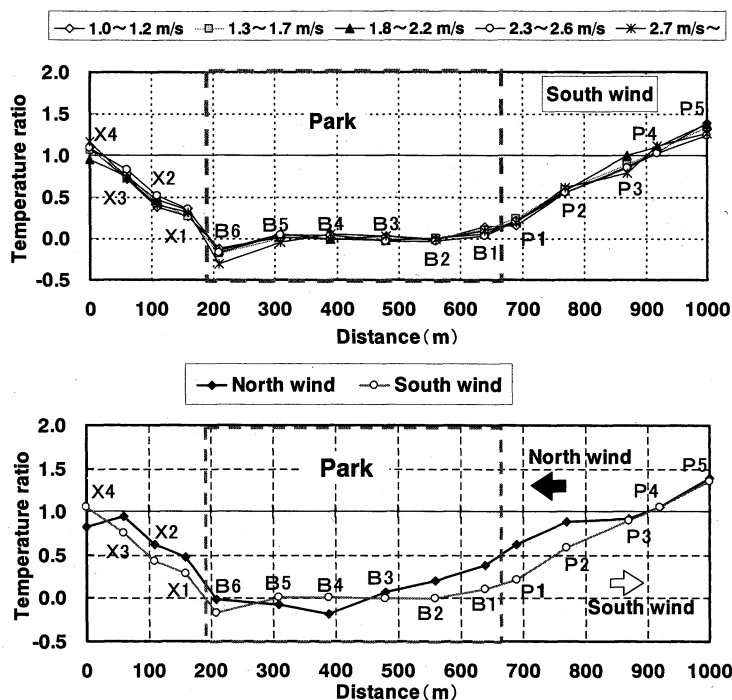


図4 測線に沿った南北断面の温度比分布

上段: 風速ランクによる比較 下段: 風向による比較

Fig. 4 Standardized air temperature distributions along measure line
Comparison of different ranges of wind speed (upper), and comparison between north and south wind (lower).

の差異はほとんどみられなかったため、以下では風向別の全データ（芝生広場での風速が10分平均で0.5 m/s以上の場合で、南風217ケース、北風27ケース）の平均値について考察する（図4下段）。

温度比が1になるまでの距離を緑地の気温低減効果が及ぶ範囲とみなすと、ここでは南北両側とも200~250 m程度となっている。また、緑地の北側境界付近に注目すると、市街地が緑地の風下側となる南風時に市街地の気温低下が大きくなっていること、逆に北風時は市街地からの暖気の流入の影響を受けて緑地内の風上側で気温上昇が起きていることが明らかである。以上のような風向による差異がみられる領域は、市街地側・緑地側それぞれ境界から約200 mの範囲となっており、温度比が1以下となる領域とほぼ一致している。同様の傾向は、他

の2測線についても明確に認められた。ただし、緑地の南側境界部分については、図4も含めて北側のような風向による気温分布の差異は必ずしも現れていなかった。

市街地の複雑さを考慮すると、緑地の影響範囲を特定するのは難しく、気象条件との関係をとらえることは容易ではない。今回、北側市街地における影響範囲には風速依存性が認められなかったが、温度比が1になる位置は、測線Rでは測定点が少ないため明確ではないが、少なくとも測線PとQでは、直交するやや広い街路の位置で一致している。強風時のデータが少ないため断定はできないが、広い街路の存在などの市街地構造が緑地の影響範囲の限界と深く関係している可能性があると思われる。また、緑地内への暖気の流入が200 mに及んでいるとい

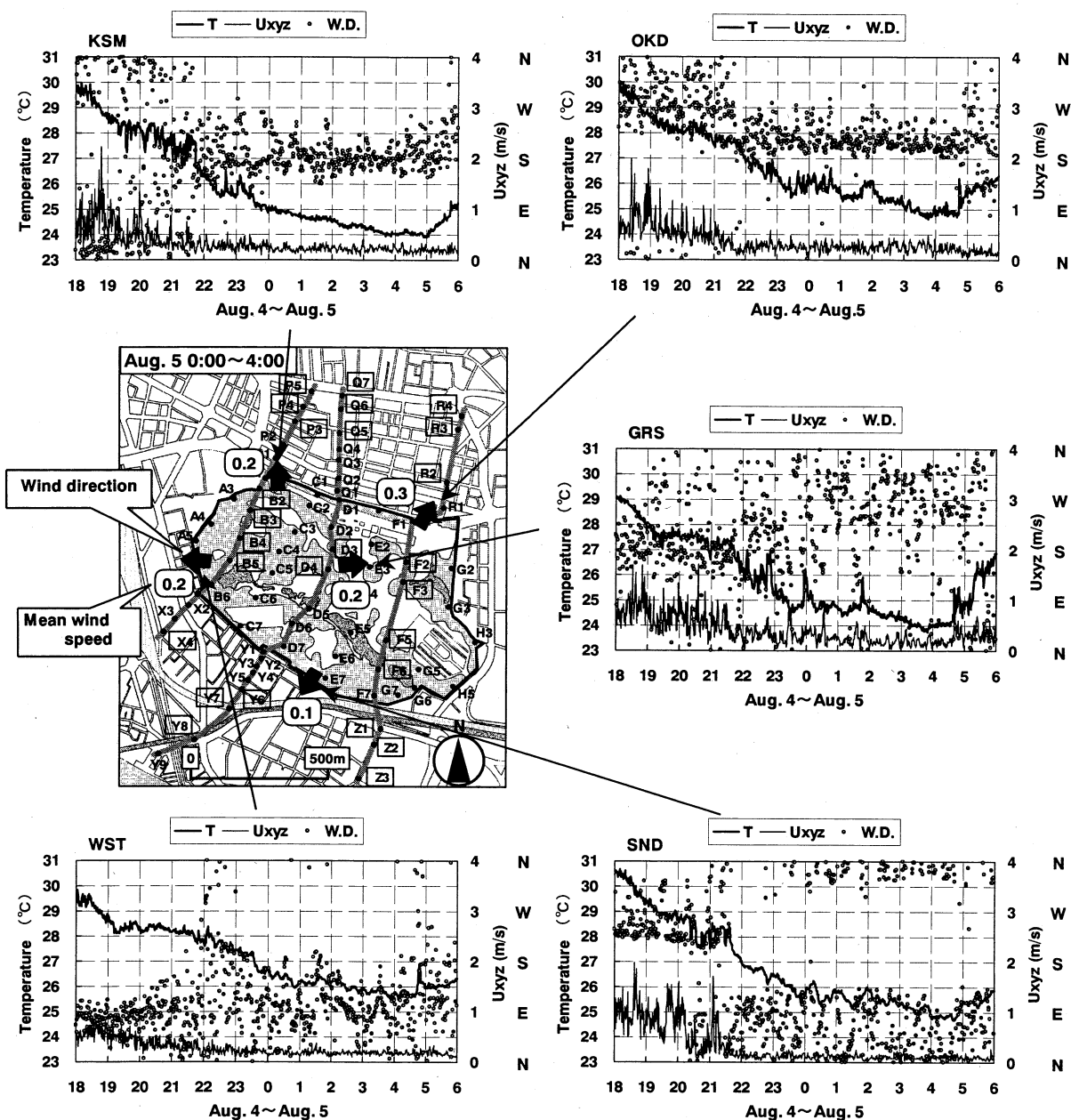


図5 静穏な晴夜における冷気の「にじみ出し現象」
緑地境界における気温、風向・風速の変化 (1分平均値)。22時頃を境に、すべての地点で緑地から吹き出す風向へと変化している。

Fig. 5 Seeping out of cool air on a calm night
Time variations of 1-min average temperature, wind speed, and direction at park boundary points. The wind direction at all points changed to outgoing from the park at about 22:00.

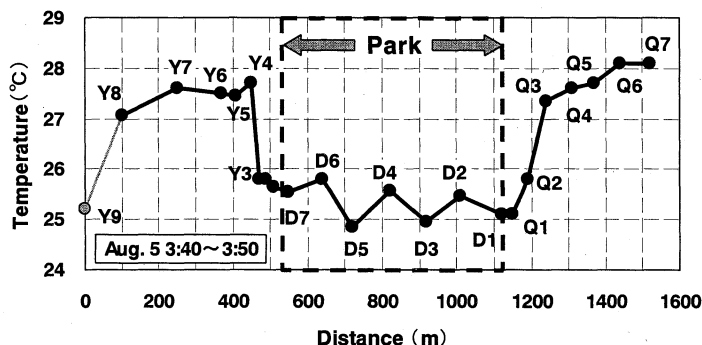


図6 「にじみ出し現象」出現時の気温断面分布
Fig. 6 Temperature distribution along the cross-section line in the seeping-out phenomenon

う結果は、少なくともこの規模以下の緑地では、緑地内外気温差にスケール効果が生じることを意味している。

V 夜間の冷気のにじみ出し現象

IVでは、断面気温分布と風向・風速との関係について考察したが、これらはほとんどが日中の時間帯の現象である。それに対し、図2に示したように夜間はほぼ無風状態となる時間帯が多く、日中とは全く異なる条件と考えられる。また、図3に示した夜間のクールアイランド強度が日によって大きく異なっている原因を探るため、ここでは静穏な夜間のデータについて詳細に検討を加える。

図5は、クールアイランド強度が夜間を通して最も大きかった8月4日夜から5日朝を取り上げ、境界に沿って配置した4台と芝生広場の1台、計5台の超音波風速温度計による風向・風速と気温の変化(1分平均値)を示したものである。4日の22時頃に注目すると、いずれの地点においても明確な気温低下(約1°C)を伴う風向変化が認められる。北側境界のポイント(KSM・OKD)では南よりの風に、南側境界のポイント(SND)では北よりの風へと変化しており、このイベントを境に境界に位置するすべての地点で、緑地内から周辺市街地に向かう風向へと変化している(図中の地図に描かれた矢印が、

イベント後の各地点の風向を表している)。以上のことから、いわゆる「にじみ出し現象」が生じていると判断される。この間(0:00~4:00)の風速は平均で0.11~0.26 m/sという静穏状態であった²⁾。

以上の結果と図3のクールアイランド強度の変化を見比べると、クールアイランド強度が大きくなる時間帯は「にじみ出し現象」が生じている時間帯ときれいに一致している。同様の「にじみ出し現象」は6日の深夜から7日の早朝にかけても起こっており、この時間帯もクールアイランド強度が大きくなっている。このように、夜間のクールアイランド強度は「にじみ出し現象」の出現と深く関わっていることが明らかとなった。

図6は「にじみ出し現象」が生じている時間帯における、緑地を貫く南北断面の気温分布(10分平均)の一例を示したものである。日中とは異なり、緑地の境界から80~90 mの位置に両側とも明確なクリフ状の急変ポイントが存在する。緑地からにじみ出た冷気は、大きな変質をしないままこの位置まで達し、市街地側の暖気と拮抗している。すなわち冷気の「にじみ出し前線」が形成されていると考えられる。なお、ポイントY9が低温となっているのは、隣接する明治神宮の緑地境界に位置するためである。Y9の気温は御苑内の平均気温とほぼ等しくなっており、神宮緑地においても御苑とほぼ同様の

冷氣形成が起こっていることを示唆している。

それでは、「にじみ出し前線」の位置は時間とともにどのように変化しているのだろうか。図6に示した気温分布は、クールアイランド強度がほぼ最大に達した午前4時前の断面であるが、にじみ出し開始からこの時間に至るまで、クールアイランド強度は時間とともに変化している。この間の前線位置に相当する気温分布のクリフの位置を検討したのが図7である。22時以降、気温差は次第に拡大しているが、クリフの位置はほとんど移動しておらず、夜間を通してほぼ同じ位置に出現している。すなわち前線位置が固定したままで、気温差のみが拡大を続けている。7日の早朝にも、継続時間はやや短いものの同様に「にじみ出し現象」が確認できたが、このときもクリフ位置は図6と全く同じ場所に形成されていた。以上のことから、夜間、少なくとも「にじみ出し現象」が起こっている場合には、緑地の影響はつねにほぼ一定の範囲に限られている可能性が高い。ただし、この領域については緑地内とほぼ等しい温度レベルとなっており、隣接する市街地よりも2~3°C 涼しい環境が形成されている。

VI 夜間冷気の生成場所

1. 芝生面と樹林地の気温差

以上のように冷気の「にじみ出し現象」は確認できたが、それではいったい御苑内のどこで主に冷気が生成されているのであろうか。図1に示すように、御苑内の土地被覆はおおむね芝生面と樹林地に大別できる。そこで、ここでは両者の気温差に注目して検討を加える。

まず、御苑全体の気温分布から考察する。図8は、「にじみ出し現象」が出現した4日夜から5日の早朝にかけての御苑全域の気温分布図（10分平均）を1時間ごとに示したものである。20時と21時の分布では、南側境界（SND）でまだ南西風が吹いていたこと（図5参照）を反映して、南側市街地か

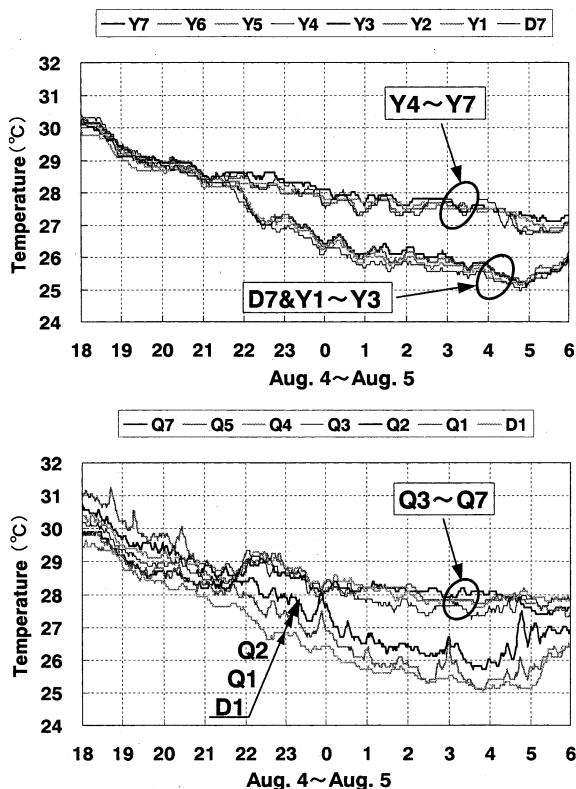


図7 「にじみ出し現象」出現夜の各点の気温時間変化

Fig. 7 Time variation in air temperature during the night

The seeping-out phenomenon appeared at 22:00.

らの暖気の流入の影響が認められる。22時と23時の段階では、中央芝生広場付近と測線Cの北端付近が低温域となっている。それが0時を過ぎると、測線C南側（池付近の低地部分）に低温域が形成され、それ以降はほとんど分布に変化がなくなる。以上のように、「にじみ出し現象」出現時には芝生広場を中心とした低温域が明確で、それに加えやや遅れて池を含む低地域にも低温域が形成されるという傾向が明らかである。

御苑内の温度測定用シェルタは、日射の影響を避けるためすべて樹冠下に設置している。そこで、次に芝生広場（GRS）における超音波風速温度計のデータを用いて、芝生面と樹林地の差異をより詳細

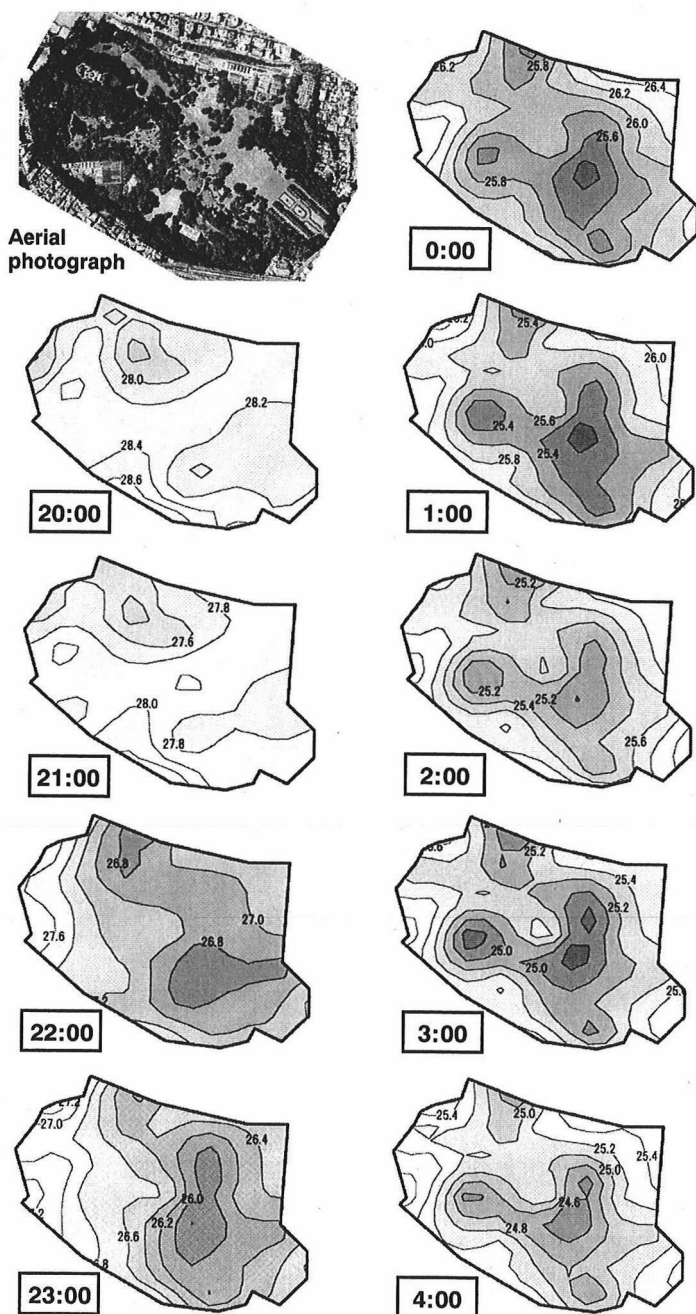


図8 「にじみ出し」出現夜の御苑内気温分布の時間変化
 Fig. 8 Spatial distributions of air temperature in the park during the night
 The seeping-out phenomenon appeared at 22:00.

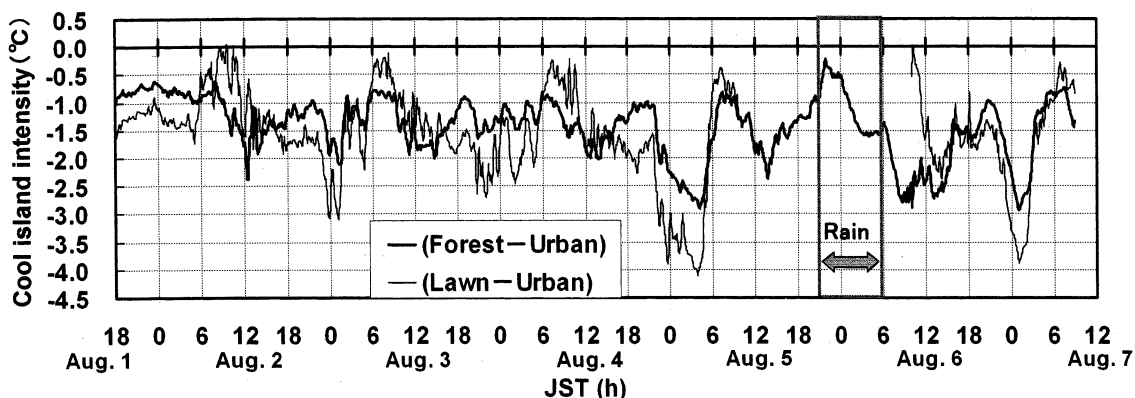


図9 芝生面と樹林地のクールアイランド強度の比較

Fig. 9 Comparison of cool-island intensity between the lawn surface in the park and the park forest area

に検討する。超音波風速温度計による気温は、原理的に日射影響を受けないというメリットがある反面、絶対値の精度に難がある。今回は、隣接樹林地との気温差が無視できると思われる強風時のデータ（10分平均で 1.5 m/s 以上）を用いて気温の絶対値を補正し、その値を芝生面の代表気温とみなした。

図9は、図3に示した樹林地に対するクールアイランド強度と、芝生面に対するクールアイランド強度の時間変化を比較したものである。日中、芝生面は樹林地よりも高温となるが、夜間は逆に樹林地よりも低温となっている。

図10は、夜間における樹林地と芝生面の気温差の成因を探るため、芝生広場（GRS）における超音波風速温度計の気温と隣接する樹冠下のポイント（D4）の気温差の時間変化を示したもので、合わせて風速と下向き長波放射量の変化を示した。まず、下向き長波放射量が増大する、すなわち天空が雲で覆われると、気温差は小さくなる傾向が認められる。また、晴天時でも風速が増加すると気温差が小さくなる傾向がある。以上のことから、放射冷却の差異で樹林地よりも低温の冷気が芝生面に形成され、風速増加時には空気が攪拌されることで気温差が解消されていると解釈できる。

2. 樹林地の気温鉛直分布

以上のように、地上レベルで比較する限り、樹林地よりも芝生面の方が低温となっている。そこで、次に樹林地に設置したタワーのデータから、夜間における樹林地内の鉛直気温分布を検討する。図11（口絵）は、ポール頂点の 16.3 m 高さの気温を基準とした気温差を求め、高度—時間断面分布として表現したもので、図5・図8と同じ4日夜～5日朝の結果である。日没後 22 時頃までは樹林内に大きな上下温度差はみられないが、にじみ出しが始まる 22 時から 0.8 m 高さを中心とした林床に低温域が現れる。0 時前に再度急激な気温低下が樹林全層で生じており、それ以降日の出まで周期的に気温が変動している。この間も最も低温なのは地上 0.8 m であるが、平均的な樹冠の上部に相当する 11.8 m 付近にも低温域が認められる。芝地のような放射冷却を念頭に置けば、樹林地での冷却面は樹冠上部であると考えられる。確かにこの高さも相対的には低温となっているが、最も低温な冷気が蓄積しているのは地上近く 1.8 m 以下の林床空間である。

図12（口絵）には、赤外線放射カメラによる深夜の熱画像の例を示した（ただし、ここで用いた画像は翌 2001 年のもので、大気補正は特に施していない）。表面温度で比較しても、芝生表面は樹冠表

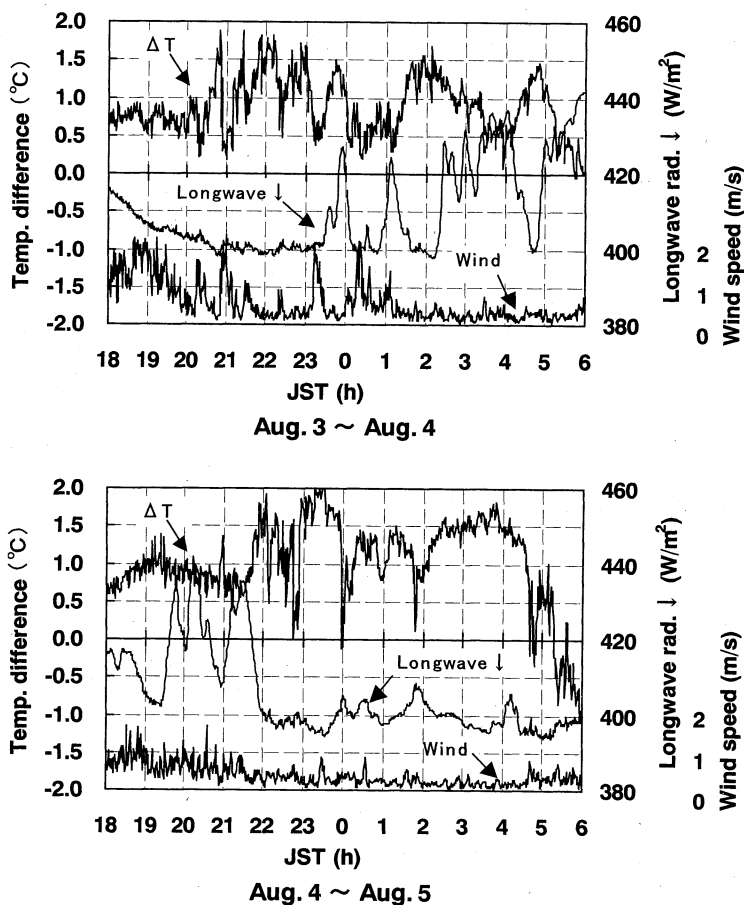


図 10 樹冠下と芝地上の気温差 (D4-GRS) の時間変化および風速・下向き長波放射量との関係
 Fig. 10 Air temperature difference under tree crowns and above the lawn surface and its relations to wind speed and downward longwave radiation

面に比べて低温となっていることが明らかである。冷気の生成に関して、樹林地と草地のどちらが有利であるかに関しては、いくつかのモデル計算結果が報告されている。代表的なものとしては、地面と植被層のおおのについて熱収支式を考える 2 層モデルによる検討で、バルク輸送係数と葉面積指数 LAI をパラメータとして樹林地と草地の熱収支を比較している (竹林ほか 2002)。以上のモデル計算で注目すべき点は、表面温度に関しては樹林地よりも草地の方が低くなるが、大気を冷却する能力、す

なわち負の顕熱フラックスに関しては樹林地の方が大きくなるという指摘である。このような結果となる理由は、樹林地の輸送係数は草地よりも大きく、また冷却面として寄与する葉面積も草地よりはるかに大きいためである。今回、顕熱フラックスに関しては後述するように芝生面でしか測定されていないため明確には結論できないが、御苑においては気温についても芝生面の方が低温となっており、樹林地の方が冷気生成に寄与しているとは考えにくい。

3. 緑地内での冷気の動き

では、図 11 (口絵) に現れた樹林地の林床の冷気は、どこで生成されたものなのであろうか。この冷気の起源を探るため、代表的な地点を取り上げ、「にじみ出し現象」が始まる前後の気温変化を詳細に比較し、冷気の動きを考察した (図 13)。

まず図 13-a はタワーの代表的な高さの気温時間変化で、先端の 16.3 m、樹冠上部にあたる 11.8 m、葉層の中心部に相当する 9.8 m、そして林床の 0.8 m の 4 高度を取り上げ比較した。図 5 の境界各地点でみられた 22 時のにじみ出し開始と同時に気温が低下しているのは林床の 0.8 m のみであり、樹冠部で明確な気温低下がみられるのは、それより 1 時間程度遅れている。したがって、少なくとも初期の林床の冷気は、樹冠上部で生成されたものが下降して蓄積したとは考えにくい。

次に図 13-b はタワーに近い測線 C の代表ポイントを取り上げ比較したもので、ポイント C3 は芝生面に近く、ポイント C4 はタワー近くの樹林地、そしてポイント C5 は池に近い低地にそれぞれ位置しており、地形は C3 から C5 へと緩やかに傾斜している。C3 と C5 の比高は約 3.5 m である。22 時以前の気温は $C5 > C4 > C3$ となっており、タワー位置より低温なのは芝生面に近い C3 で、それ以降もタワーのある樹林地は芝生面近くより終夜高温である。また 22 時以降、低地 C5 の気温が最も低下し、0 時以降は 3 地点の中で最も低温となっている。以上の変化は、芝生面で生成された冷気が樹林地を通り、池付近の低地へと流下していることを示唆している。

一方、図 13-c は中央芝生広場を横切る測線 E の各点の変化で、これらのポイントではすべてにじみ出しが始まった 22 時から急激に気温が低下している。ただし市街地との境界に近いポイント E1 では気温低下が鈍く、市街地の暖気の影響を受けていると思われる。それ以外のポイント E2~E4 は、同

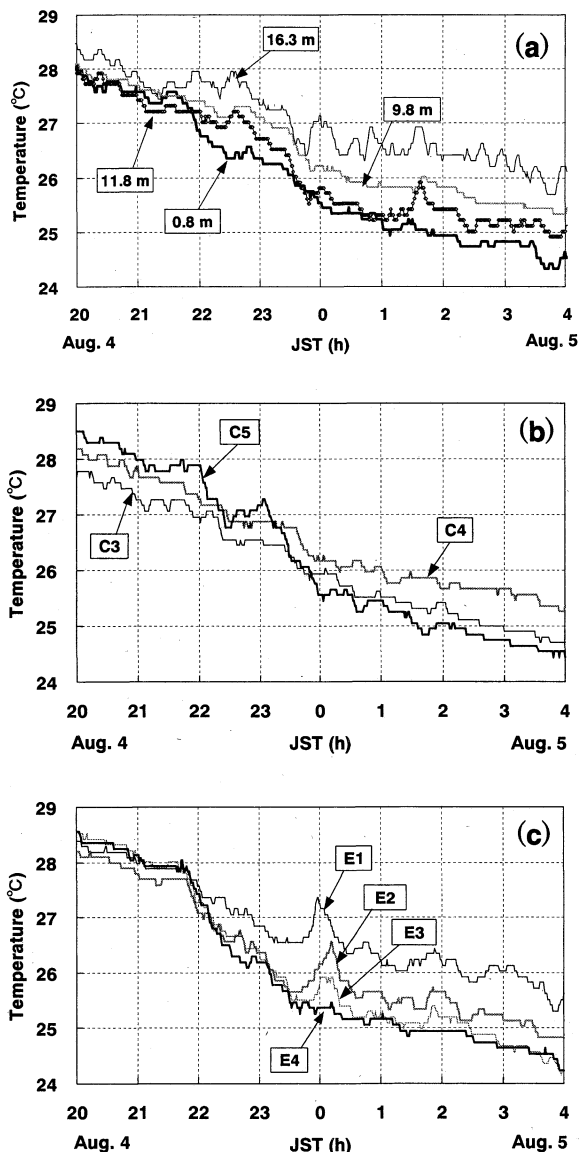


図 13 「にじみ出し現象」出現夜の各点の気温時間変化

a: タワーの代表的高度 b: 測線 C c: 測線 E

Fig. 13 Time variation in air temperature during the night

The seeping-out phenomenon appeared at 22:00.

a: at typical heights of the tower in the park forest
b: on measuring line C c: on measuring line E

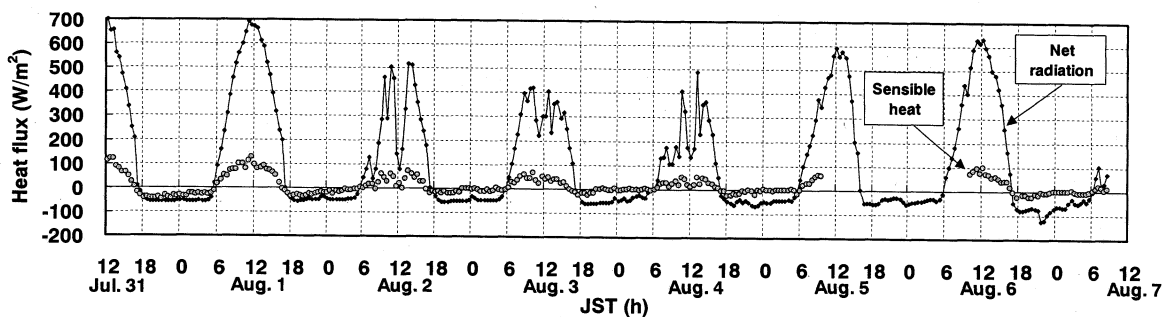


図 14 芝生広場 (GRS) における正味放射量と渦相関法による顕熱フラックスの時間変化
 Fig. 14 Time variations in net radiation and sensible heat flux at the lawn surface (GRS)
 The sensible heat flux was measured using the Eddy correlation method.

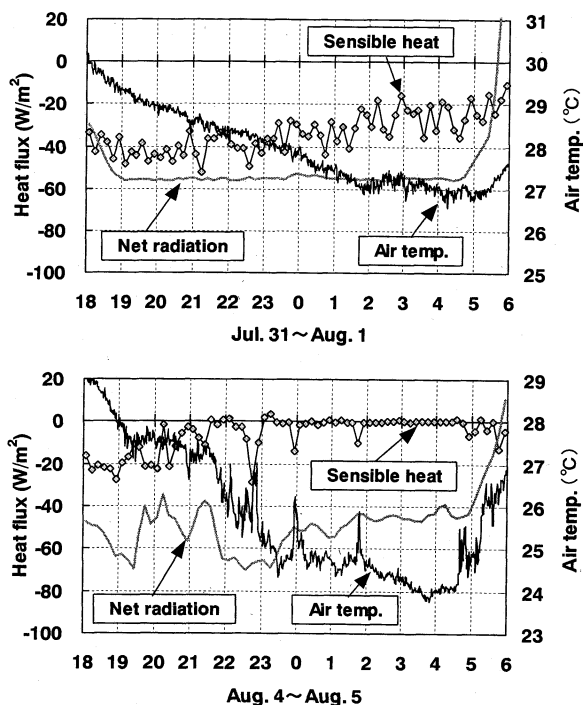


図 15 芝生広場 (GRS) における夜間の正味放射量と顕熱フラックスの時間変化と気温変化の関係

上: 有風条件 下: 静穏条件

Fig. 15 Time variations in net radiation and sensible heat flux at the lawn surface (GRS) during the night

upper: windy conditions lower: calm conditions

時刻で比較すると図 13-b の測線 C より低温となっており、樹林地よりも中央芝生広場が先行して低温となっていることがわかる。なお、0 時頃には、E1 → E2 → E3 と北側市街地からの一時的な暖気の流入が明確に認められる。

以上の図 13 の変化から総合的に推測すると、タワーの林床付近に蓄積していた冷気は、芝生面からの移流と考えるのが自然である。したがって、御苑に関しては、夜間の冷氣生成に寄与しているのは樹林地よりも芝生面であると考えられる。

VII 芝生面の顕熱フラックス

芝生広場 (GRS) に設置した超音波風速温度計のデータから渦相関法で顕熱フラックスを求め、同所の放射観測データと比較した。図 14 は、短波長・長波長の上向き・下向きの 4 成分から求めた正味放射量 (30 分平均) と評価時間 30 分で算出した顕熱フラックスの時間変化を示したものである。顕熱フラックスの値は日中でも 100 W/m^2 程度で、正味放射量の 6 分の 1 程度であった。また日没後には負に転じており、夜間は heat sink として周辺空気を冷却している。しかしながら、「にじみ出し現象」が出現した静穏な時間帯については、顕熱フラックスの値はほぼゼロとなっている。夜間の顕熱フラックスの変化はこのようなやや複雑で、風速条件で明確な違いがみられる。

図 15 は、観測期間中で最も風速が大きかった 7 月 31 日から 8 月 1 日にかけての夜と、「にじみ出し現象」がみられた 8 月 4 日から 5 日の静穏な夜の顕熱フラックス（評価時間 10 分）を比較したものである。有風時には、夜間を通して $30 \sim 40 \text{ W/m}^2$ の負の乱流フラックスがみられるのに対し、「にじみ出し現象」出現時には乱流フラックスがほとんどゼロに等しくなっていることがわかる。しかし、芝生面の気温低下量はフラックスの大小とは逆に有風時に小さく、夜間のクールアイランド強度は負の顕熱フラックスが大きくなる場合に小さくなる。なお「にじみ出し現象」出現時にいくつか数分程度の短い気温上昇がみられるが、そのときには必ず負の乱流フラックスを伴っている。すなわち、一時的な強風により安定成層が破壊され、地表付近では気温上昇が起こったと考えられる。

以上のように、夜間にクールアイランド強度が大きくなるのは、放射冷却による接地逆転層が壊されない静穏時で、地表付近の冷気が上空や周囲へ拡散されないことが大きな要因である。しかしながら、このような条件下では、乱流交換が抑制されるので大気を冷却する負の顕熱フラックスは逆に非常に小さい。したがって、緑地内の気温が低下することと、周辺大気を冷やす効果とは、おのおの別々に考えるのが妥当であるといえる。

VIII ま と め

本研究では、新宿御苑を対象に都市内緑地の微気象観測を行い、周辺市街地への熱的影響範囲の把握、特に夜間の「にじみ出し現象」の把握と風による気温分布の変化、芝生広場の熱収支特性などを中心に検討を試みた。研究の成果を要約すると次の通りである。

(1) 緑地と周辺市街地との気温差であるクールアイランド強度は、日中についてはほぼ一定した変化であったが、夜間については日によって大きく変化

していた。したがって、たとえば緑地の規模による気温低下量を比較するために異なる日の観測結果を比較することは好ましくなく、細心の注意を払わないと同じ土俵で比較することはできないといえる。日中に限った場合でも、降雨の履歴には注意が必要である。

(2) 緑地と市街地の境界付近の気温分布は風向によって変化し、緑地に向かう風向時には、緑地内への暖気の流入が起こっている。風下方向の市街地への緑地の影響範囲は $200 \sim 250 \text{ m}$ であった。一方、緑地内への暖気の流入範囲も 200 m 程度に及んでおり、少なくともこの規模以下の緑地では緑地内外気温差にスケール効果が現れると考えられる。

(3) 緑地の境界に超音波風速温度計を多数設置することにより、晴天かつ静穏な夜間に「にじみ出し現象」が起こっていることを明確にとらえることができた。にじみ出しの平均風速は $0.1 \sim 0.3 \text{ m/s}$ で、「にじみ出し現象」出現時にクールアイランド強度が大きくなる。このとき気温の断面分布には非常にシャープな温度ギャップ（クリフ）が現れる。この冷気の到達限界の位置は、緑地の境界から $80 \sim 90 \text{ m}$ で終夜ほぼ固定しており、クールアイランド強度の時間変化とは無関係であった。

(4) 樹林地と芝生面を比較した場合、日中は日陰をつくる樹林地の方が低温となるが、夜間の冷気の生成に寄与しているのは芝生面であった。夜間、芝生面は表面温度も樹冠より低く、気温の水平分布でも中央芝生広場周辺が低温域となっていた。樹冠下と芝生面の気温差は、下向き長波放射量と風速に依存しており、放射冷却により生成され、それが時おり強制対流で減ぜられていると解釈できる。

(5) 芝生面の顕熱フラックスは、夜間は負の値を示した。しかし、クールアイランド強度が大きくなる「にじみ出し現象」出現夜は、顕熱フラックスは逆に小さくほぼゼロとなっていた。換言すれば、大気との乱流熱交換が抑えられているので、放射冷却

による冷気が緑地内に滞留し、より低温となると解釈できる。したがって、クールアイランド強度の大小と、大気を冷却する効果の大小は、別のものととらえるのが妥当である。

今回の観測では「にじみ出し現象」の存在は明確にとらえることができたが、「にじみ出し」が起きている層の厚さに関しては把握していない。もし緑地の境界上のすべてで「にじみ出し」しているとすれば、緑地内に下降気流が存在しているはずであるが、その気流がどの程度の速度を持つかを推定する意味でも「にじみ出し」の層の厚さを把握することが今後の課題である。

緑地内外の気温差は、これまでも数多く報告されてきたが、それらは(1)緑地の構成(樹林地か草地か)、(2)気象条件(降雨履歴や風速条件)、(3)緑地内気温の定義(最低値か空間平均か)、同様に(4)基準となる市街地気温の定義、(5)評価時間の採り方(使用測器の応答性にも関係)などを考慮しないと単純な比較はできないことが本研究からも明らかとなった。市街地気温の定義に関しては本研究でも十分とはいえず、問題として残された。気温の鉛直構造の比較も含め、今後あらためて検討を加えたい。

本稿は、2001年度日本地理学会春季学術大会において発表した内容に加筆をしたものである。本観測の実施にあたり、新宿御苑管理事務所の方々に便宜を図っていただいた。また、竹中工務店の三坂育正氏ならびに東京都立大学・日本工業大学の学生諸氏に御協力いただいた。ここに記して心から謝意を表します。

(投稿 2003年3月19日)

(受理 2003年12月6日)

注

- 1) できれば、通常の微気象観測で設定される1.5 m高さで統一したかったが、市街地ではいたずらなどの保守上の問題から、御苑内では入園者への配慮から、2 m高さとした。
- 2) 超音波風速計による10 Hz サンプリングの計測である

ことから、4時間の平均風速の値として、小数点以下2ケタの風速値は有意と判断した。

文 献

- 入江彰昭・平野侃三 1995. ランドサット TM データ解析による都市の気象緩和に有効な緑地形態に関する基礎的研究——千葉市域を事例として. 第30回日本都市計画学会学術研究論文集: 325-330.
- 入江彰昭・平野侃三 1998. ランドサット TM データ解析による緑地の分布形状と表面温度との解析. ランドスケープ研究 61: 593-596.
- 神田 学・日野幹雄 1989. 植生による気候緩和効果に関する基礎的研究. 第33回水理講演会論文集: 685-690.
- 神田 学・稲垣 聡・日野幹雄 1991. 夏期に森林・水面が果たす気候緩和効果に関する実測とその周辺域への影響伝達機構に関する数値解析による検討. 水工学論文集 35: 585-590.
- 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・大気浄化機能の評価 (1) 1996年夏期集中観測. 天気 44: 713-722.
- 清田 信・平野高司・相賀一郎 1993. 植物による都市の熱環境緩和. 環境情報科学 22: 96-100.
- 近藤三雄・間仁田和行・横山容三・小沢知雄 1983. 樹木、芝生の微気象調節効果に関する実証的研究. 造園雑誌 46: 161-175.
- 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: 506-517.
- 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.
- 成田健一・清田誠良 1998. 都市内緑地の環境調節効果に関する実測研究. 第12回環境情報科学論文集: 269-274.
- 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.
- 福井英一郎 1956. 都市における気温分布と緑地. 都市問題 47(7): 11-17.
- 福本啓二・森山正和・松本 衛 1988. 都市気温に対する緑地の効果に関する研究——数値解析による検討. 日本建築学会大会学術講演梗概集 (D 環境工学): 941-942.
- 藤崎健一郎・半田真理子 1994. 公園、街路等の植栽が微気象に及ぼす影響. 造園雑誌 57: 151-156.
- 本條 毅・高倉 直 1984. 緑地が都市内熱環境に及ぼす影響 (1) 実測に基づく熱収支的解析. 農業気象 40: 257-261.
- 本條 毅・高倉 直 1986. リモートセンシングによる都市内緑地の温度分布の解析. 造園雑誌 49: 299-304.

- 本條 毅・高倉 直 1987. ランドサット TM データによる都市内緑地の抽出. 造園雑誌 50: 305-309.
- 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: 323-328.
- 本條 毅・高倉 直 2000a. 緑地熱環境評価のための 2 次元 κ - ϵ モデルの検証. 農業気象 56: 243-251.
- 本條 毅・高倉 直 2000b. 都市緑地のスケール, 配置変化に関する影響のシミュレーション解析. 農業気象 56: 253-260.
- 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・河野 仁・吉田篤正・宮崎ひろ志・竹林英樹 2001. 都市における樹林のクールスポット効果に関する実測データ解析. 日本建築学会計画系論文集 541: 49-56.
- 山田宏之・丸田頼一 1989. 都市における緑地の気象緩和作用についての実証的研究. 造園雑誌 52: 127-132.
- 山田宏之・丸田頼一 1991. 緑地による都市気候緩和作用の定量的解析. 造園雑誌 54: 299-304.
- 山田宏之・丸田頼一 1992. 埼玉県庄和町における都市気温分布と緑地の気象緩和作用について. 造園雑誌 55: 349-354.
- 山田宏之・丸田頼一・中村雅展 1992. 長野市における気温・湿度分布と緑地の気象緩和作用について. 造園雑誌 55: 291-308.
- 山田宏之 1993. 埼玉県栗橋町における都市気温分布と緑地の夏季の気温低減効果について. 造園雑誌 56: 331-336.
- 尹 龍漢・丸田頼一・本條 毅・柳井重人 1998. 都市における公園内外の気温分布特性. ランドスケープ研究 61: 769-772.
- Katayama, T., Ishii, A., Hayashi, T., and Tsutsumi, J. 1993. Field surveys on cooling effects of vegetation in an urban area. *J. thermal Biology* 18 (5/6): 571-576.
- Saito, I., Ishihara, O., and Katayama, T. 1991. Study of the effect of green areas on the thermal environment in an urban area. *Energy and Buildings* 15-16: 493-498.
- Spronken-Smith, R. A., and Oke, T. R. 1999. Scale modeling of nocturnal cooling in urban parks. *Boundary-Layer Meteorology* 93: 287-312.

Geographical Review of Japan 77-6 403-420 2004

Cool-island and Cold Air-seeping Phenomena in an Urban Park, Shinjuku Gyoen, Tokyo

NARITA Ken-ichi*, MIKAMI Takehiko**, SUGAWARA Hirofumi***, HONJO Tsuyoshi****,

KIMURA Keiji*****, and KUWATA Naoya*****

(*Nippon Institute of Technology, **Tokyo Metropolitan University, ***National Defense Academy of Japan, ****Chiba University, *****Hokkaido University, *****Nissan Motor Co., Ltd.)

Green spaces in urban areas as well as water surfaces have been expected to mitigate the urban heat island effect. In the hot and humid summers in Japan, their cooling effect is especially valuable as a natural resource for city planning. In this paper, we show the results of micro-climatologic observations performed in and around the large park Shinjuku Gyoen during summer. The park is 58.3ha, and located in one of the main business districts of Tokyo. It consists of a dense forest area, lawn area, and ponds. The topography in the park is almost completely flat but is a few meters lower around the ponds than their surroundings.

We observed the air temperature distribution in and around the park at 1-min intervals. We placed a total of 88 automatic temperature recorders along three measuring lines which crossed through the park. To record the cold air-seep phenomenon during calm conditions, we placed four three-dimensional ultrasonic anemometer-thermometers along the park boundary and at the center of the park. Their measuring height was about 1.5 m above ground, and sampling frequency was 10 Hz.

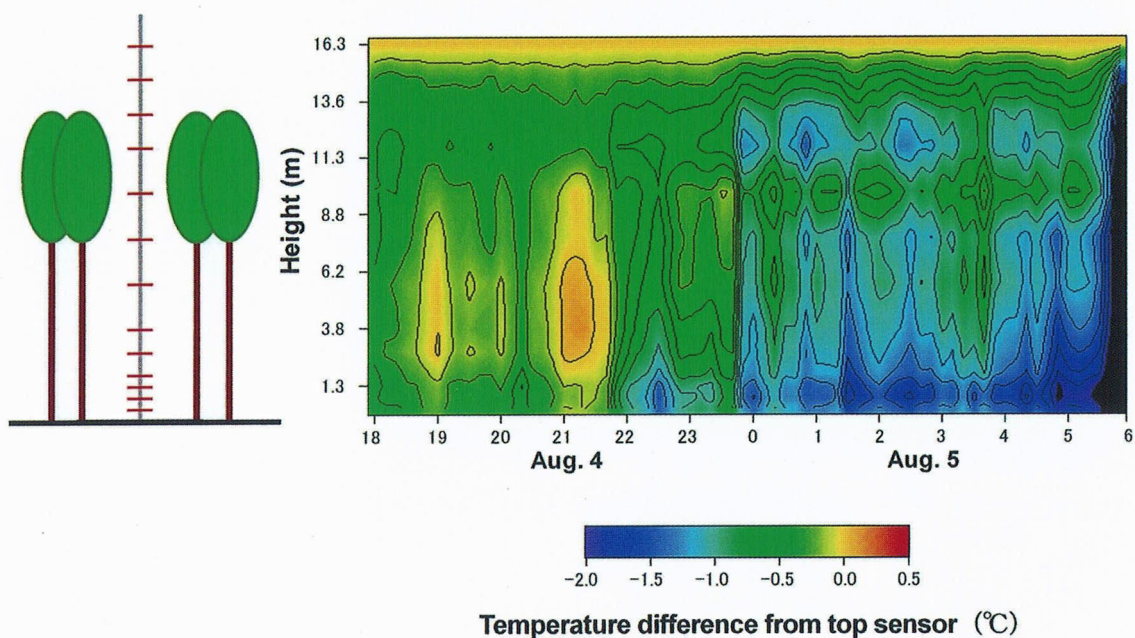
The park was always cooler than the surrounding built-up area. On the other hand, there was a temperature difference within the park, i.e., the cool-island intensity was larger for the park forest during the daytime, but larger for the park lawn surface during the nighttime. In daytime windy conditions, a cold air mass from the green space chilled the leeward built-up area to about 250 m from the park boundary.

In clear calm midnight conditions, wind flowed out from the park to the surrounding area at all measuring points on the boundary. The wind direction changed and began to flow out obviously at about 22:00 LST and air temperature on the park boundary fell 1°C at the same time. After that, the decline in air temperature was not constant, and periodic oscillation was seen at some points. These results imply the accumulation of a cold air mass in the park and its gravitational outflow into the surrounding area. A significant air temperature drop in the adjacent built-up area was observed within the range of 80–90 m from the park boundary. This cold air seep is limited within a certain range through the night regardless of cool-island intensity.

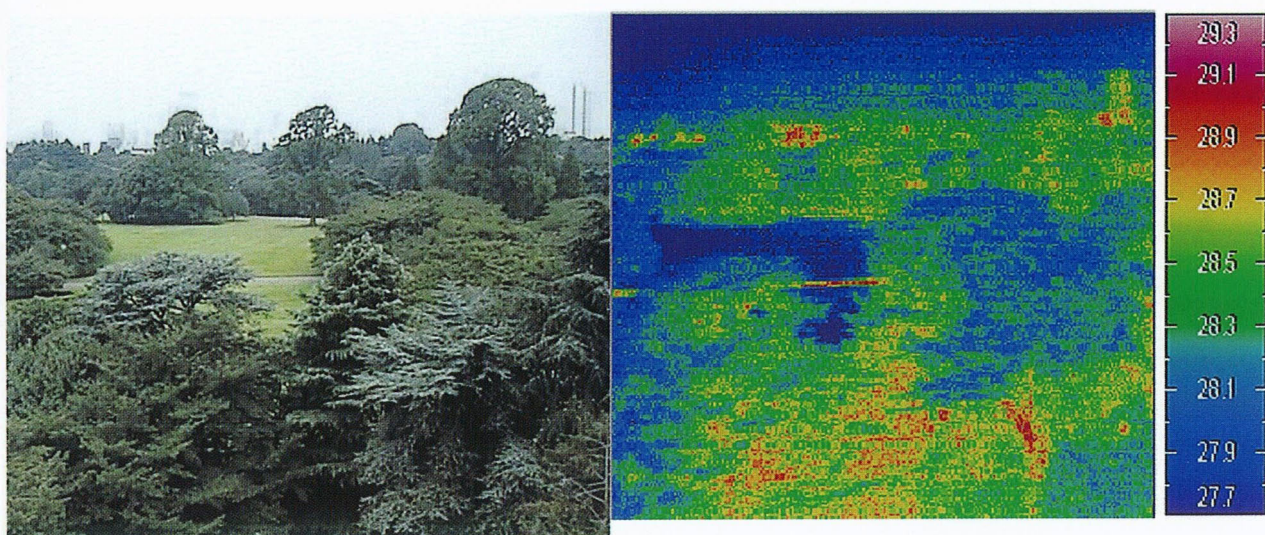
Air temperature above the lawn surface was lower than that under tree crowns during the night. This temperature difference was diminished by intermittent cloud cover. Thus the radiative cooling on the lawn surface should be the source of cold air seeping out at the park boundary.

During the seeping out of cold air, the cool-island intensity increases, but sensible heat flux (at the park lawn surface) was almost zero. The cooling ability of parks is not directly related to cool-island intensity.

Key words: urban climate, green space, cold air, heat budget, radiative cooling



成田ほか 図11 「にじみ出し現象」出現夜の樹林地における気温鉛直分布の時間変化
 Narita et al. Fig. 11 Time-height section of air temperature at the forest tower during the night
 The seeping-out phenomenon appeared at 22:00.



成田ほか 図12 熱画像による樹林地と芝地の表面温度の比較 (2001年8月4日午前2時)
 Narita et al. Fig. 12 Thermal image of the forest crown and lawn surface at night (at 2:00 a.m. on August 4, 2001)