

新宿御苑のクールアイランド

成田健一 (日本工業大学)

キーワード: 緑地、冷気流、放射冷却、顕熱フラックス、

新宿御苑のクールアイランドについて、その実態を観測に基づいて解説した。晴天・静穏な夜間は、放射冷却により御苑内に冷気が蓄積され、その冷気が周辺市街地へ重力流的に全方位に向かって流れ出る。このような冷気流出は「にじみ出し」現象と呼ばれ、その流速は0.1~0.3m/s、到達範囲は御苑の境界から80~90m、冷気の厚みは9~13mであった。日中の卓越風による風下側市街地への冷気の移流拡散とは全く異なる現象である。にじみ出し現象発生時は周辺市街地との気温差は大きくなるが、周辺大気を冷却する作用(負の顕熱フラックス)は小さくなっている。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、別のものと考えてるのが妥当である。

はじめに

筆者らは、1999年から首都大学東京(三上岳彦)・防衛大学(菅原広史)・千葉大学(本條毅)らとの共同研究として、新宿御苑を対象としたクールアイランドに関する微気象観測を行ってきた。観測は、毎年テーマを変えながら2005年夏までトータル7年間にわたり実施された。ここでは、それらの成果として明らかとなった、新宿御苑のクールアイランド現象の実態について紹介する。

新宿御苑は、新宿駅東側の繁華街近くに位置し、芝生地、樹林地などからなる周囲約3.5km、面積58.3haの緑地である。



写真-1 新宿御苑の空撮(南東方向より北西方向を望む)

[帝京大学・三上岳彦氏提供]

1. クールアイランド強度

図1は、2000年夏の観測における測器配置図である。ここでは、南北の卓越風向に沿って3本の測線を設定し、気温分布の測定を試みた。それとは別に御苑内にはできるだけグリッド状になる気温測定点を設け、苑内の平面的な気温分布の把握を計画した。なお、中央の芝生広場には熱収支観測のため、また市街地との境界線上の4ヶ所には後述する冷気のにじみ出し現象をとらえるため、超音波風速温度計を配している。

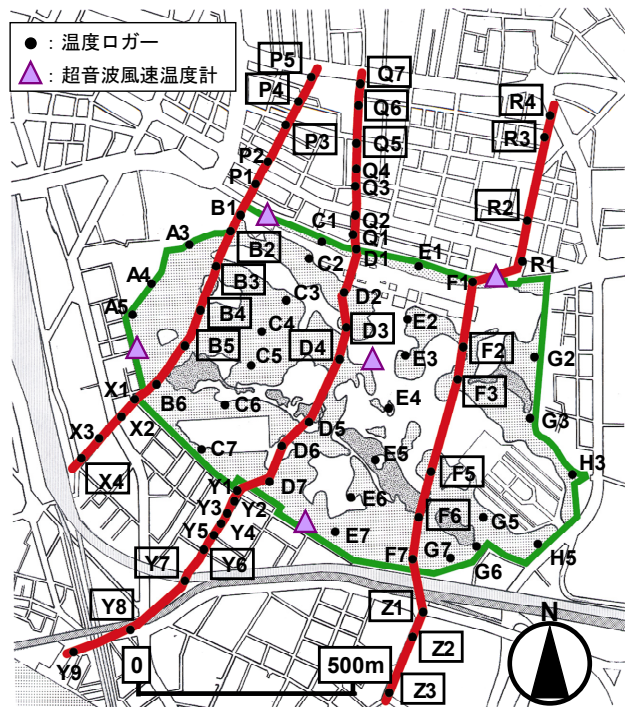


図-1 測器配置図(2000年夏の観測)

緑地のクールアイランド強度を議論する上で一番問題となるのは、リファレンスとしての市街地の代表気温をどう把握するかという点である。ここでは、図-1の測定点のうち、地点記号を四角で囲んだ16地点の平均値を採用した。一方の緑地の平均値についても、同じく四角で囲んだ11地点の平均値を用い、クールアイランド強度を算出した。次節で詳述するように、市街地側・緑地側ともに境界に近い地点では移流の影響を受けるため、上記の地点の選定からは外している。

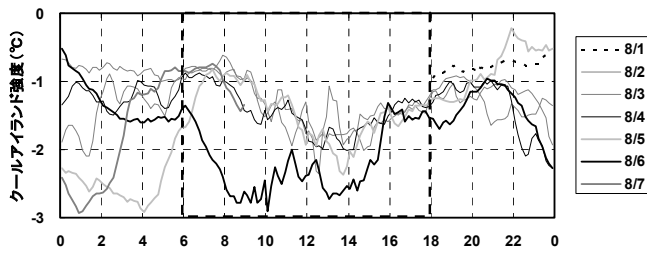


図-2 クールアイランド強度の日変化

図-2は、7日間のクールアイランド強度の日変化を示したものである。8/5の深夜から8/6の早朝にかけて降雨があったため、直後の8/6午前中の値が特異的に大きくなっている。このように雨上がりには緑地内の潜熱フラックスの影響で、緑地内外気温差が大きくなる。しかしながら、それ以外の晴天日については、日中のクールアイランド強度はほぼ一定で、朝夕は1℃程度、正午過ぎの最高気温時は2℃程度で安定している。

一方、夜間については日毎の変動が非常に大きく、場合によっては日中を上回る3℃近くに及ぶ日もある。また、ピークが現れる時間帯も日によってまちまちである。このような、夜間のクールアイランド強度の大きな変動は、後述する冷気の「にじみ出し」現象と大きく関わっている。

2. 日中の風下市街地への冷気の移流

緑地がもたらす熱的效果として最も期待されているのは、夏季日中の暑熱緩和効果である。東京都が2006年に発表した「10年後の東京」という将来ビジョンにおいても、東京湾から皇居などの都市内大規模緑地をつなぐ「風の道」が描かれ、緑地を通った風が風下側の市街地を冷やす効果が期待されている。

図-3は、御苑を横断する測線に沿った日中の気温分布を、風向別に示したものである。10分平均値で描いた各時間帯の気温分布は、気温の絶対値も気温差もばらばらである。ここでは、風向による分布パターンを抽出するため、図-1のクールアイランド強度の算出に用いた市街地平均気温と御苑内の平均気温を用いて各時間帯の気温分布を温度比の形で表わし、その結果を風向別に平均した。温度比=0が御苑平均気温、温度比=1が市街地平均気温を意味している。

図の右側の北側境界付近に注目すると、南風時は北側市街地の気温が北風時よりも低く、御苑内からの冷気の移流が起こっていることを示している。冷気の影響範囲を温度比=1となる地点と定義すると、200~250mとなる。一方、北風時には北側市街地に隣接する御苑内部で昇温が認められ、市街地からの暖気の移流が認められる。

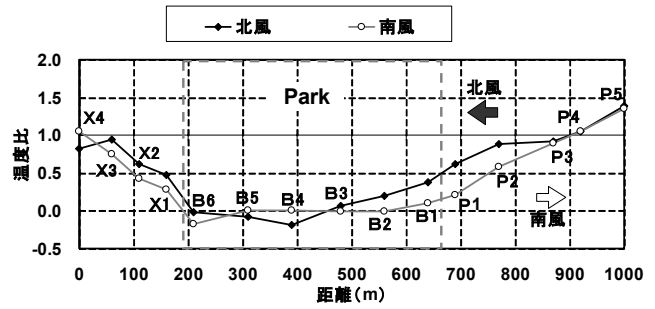


図-3 測線に沿った南北断面の気温分布(風向別)

本来ならば、南側境界でも同様の差異が現れるはずであるが、ここでは明確ではない。

3. 夜間の冷気の「にじみ出し」現象

図-2に現れた夜間のクールアイランド強度の大きな変動の要因を探るため、最も大きな気温差が観測された8/4~8/5にかけての超音波風速温度計のデータを解析した(図-4)。ここでは、代表的な北側と南側の2地点のみについて気温と風向・風速の1分平均値の結果を示した。北側の地点では、22時頃に急激な気温低下が認められ、それに伴って風向が北寄りから南風へ変わっている。一方の南側の地点では、ほぼ同時刻にやはり気温低下と風向の変化が起こっており、南西風から北東風へと反転している。このイベント後は風向が安定しており、風速は非常に弱く変動も小さい。図中の矢印と数字は、他の超音波風速温度計の地点も含めた、0時~4時の平均風向と風速を表わしている。日中の風による移流とは異なり、全方位にゆっくりとした流れで冷気が流出している。このように、乱流拡散を伴わずに重力流的に全方位に緑地の冷気が流出する現象を、我々は冷気の「にじみ出し」現象と呼んでいる。

「にじみ出し」という言葉は、もともと丸田(1972)で用いられた用語であるが、このときは気温の水平分布のみから推定したもので、今回のように気流の変化を直接とらえたものではない。しかも、丸田が指摘したのは日中についての考察からで、物理的なメカニズムとしても、今回の図-4の現象とは異なっていると思われる。

図-5は、クールアイランド強度が最大となった午前4時前の測線に沿った気温分布を表わしている。図-3の日中の分布とは大きく異なり、冷気はほぼ御苑内の冷たさを保ったまま広がっており、流出限界では温度クリフ(崖状の気温の急変)を形成しており、にじみ出しの範囲は境界から80~90mとなっている。なお、左端のY9地点は隣接する明治神宮の入口に位置しており、御苑とほぼ同温度の冷気が同じように生成されていることがわかる。

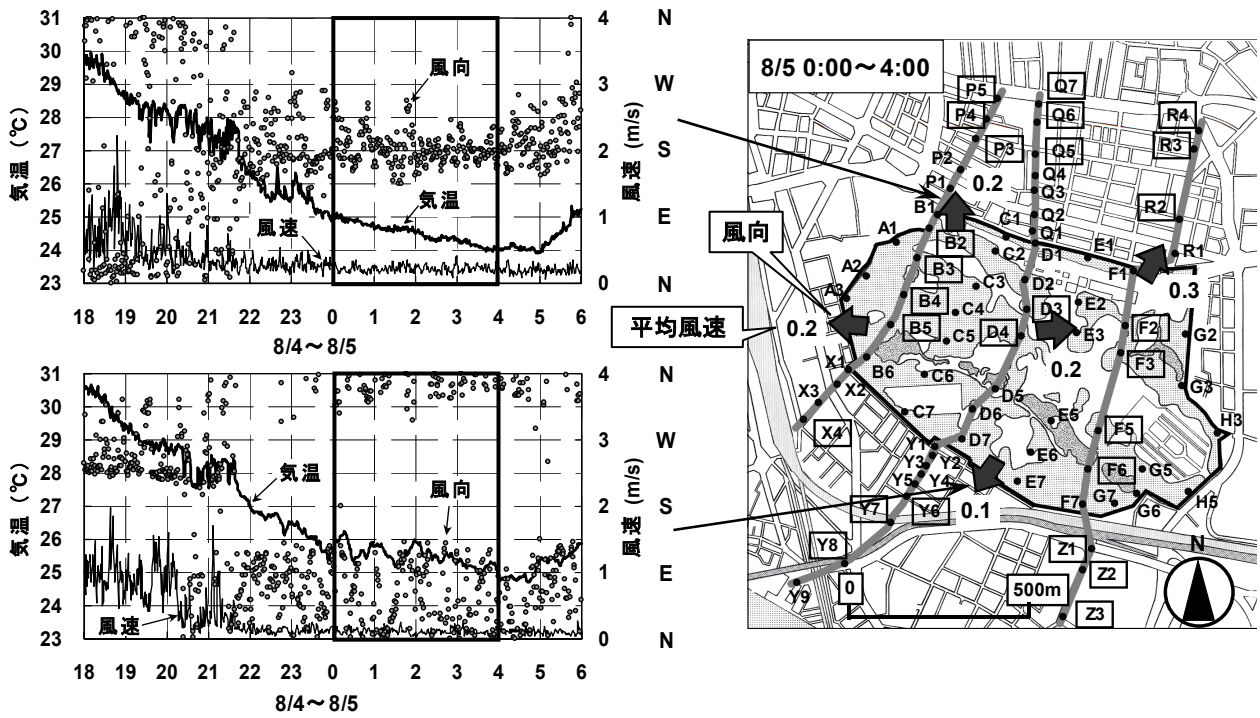


図-4 超音波風速温度計による気温と風向・風速の時間変化（右図の太い矢印は、にじみ出し発生時の風向を表わす）

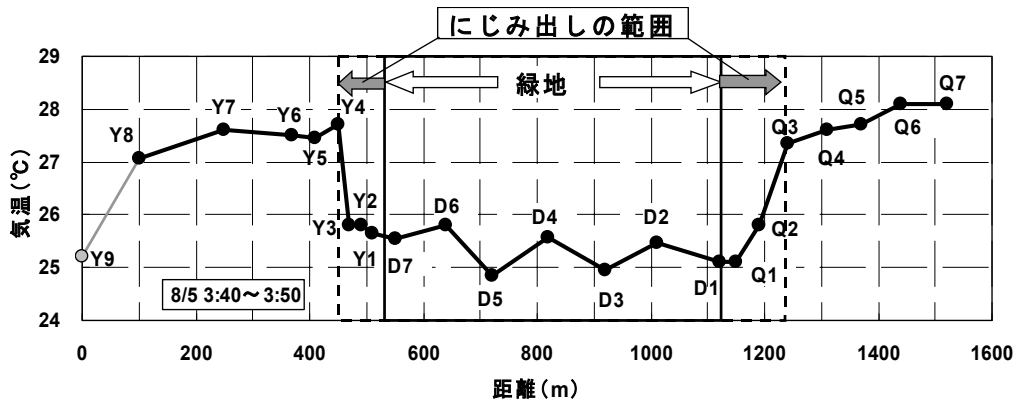


図-5 にじみ出し発生時の気温断面分布とにじみ出しの範囲

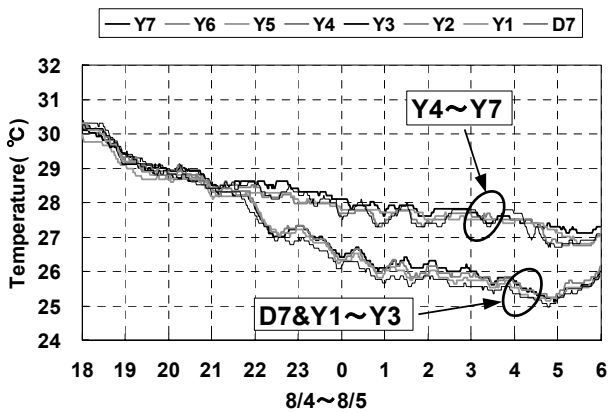


図-6 にじみ出し発生夜の各地点の気温時間変化

図-6は、図-5に示した気温分布の南側市街地部分の各地点の気温時間変化である。にじみ出しが発生する22時以降、クールアイランド強度は徐々に大きくなるが、にじみ

出しのフロントの位置は、にじみ出し発生直後から変化しておらず、常にY3とY4の間に固定している。すなわち、にじみ出しの範囲はクールアイランド強度とは無関係に決まっている。この位置は他の日もほぼ一致しており、なぜ常にこの位置で冷気流出が止まるかについては、まだ明確に解明できていない。

このような冷気は、いったいどの程度の厚みで流出しているのだろうか？2003年夏、この点を明らかにするため、南側境界でバルーンを用いた高さ21mまでの気温の鉛直観測を実施した。これと併せて、図-6の測線に沿った気温鉛直分布の移動観測も実施した。ただ、こちらは電線等による制約から高さ6mまでの測定となった。図-7は、気温時間断面分布の一例である。この日は午前0:40頃からにじみ出しが始まり、2:40~3:20の間一旦止まったが、その後再度「にじみ出し」が起こっている。

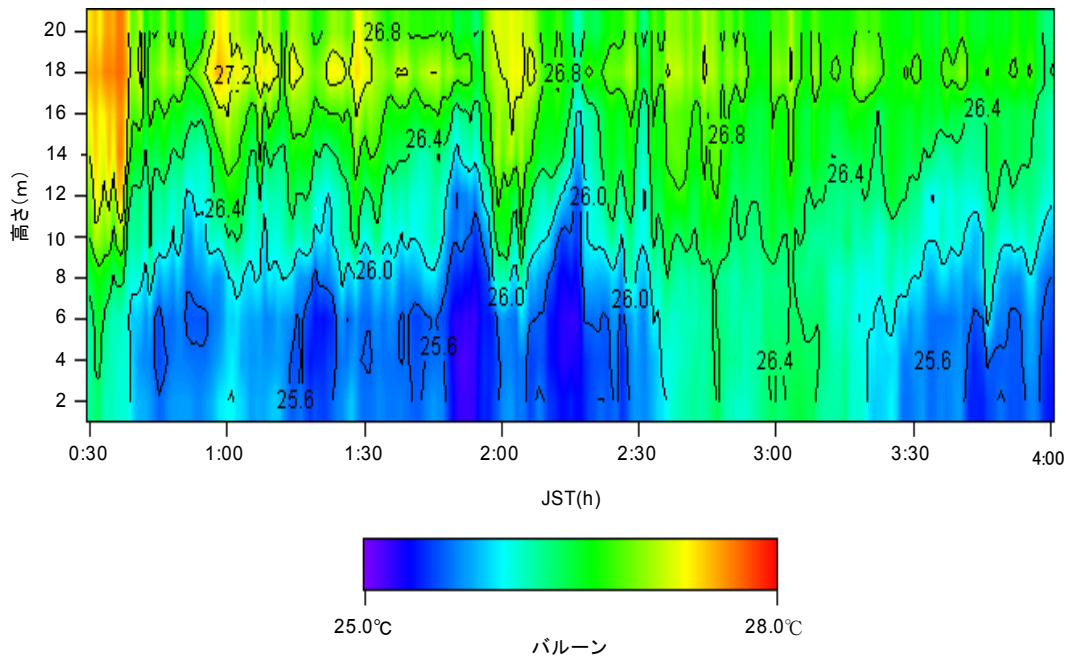


図-7 にじみ出し発生時の気温-時間断面分布 (2003年8月24日)

冷気の厚さは、冷気流出の強さ（冷たさ）に応じて時間的に変動しており、9～13m、一時的には16m程度に及んでいる。これは2階建ての戸建て住宅ならば、すっぽりと覆う厚さである。

一方、測線に沿った移動観測の結果、冷気フロントの位置において少なくとも冷気層は6mの厚みが維持されており、しかも6mの範囲ではフロント位置にずれは生じていなかった。すなわち、いわゆる前線で見られるような、冷気が市街地の暖気の下層に楔形に潜り込むというような気温分布は確認できなかった。

4. 夜間冷気の生成メカニズム

にじみ出し現象を発生させる冷気は、御苑内のどこで生成されるのだろうか？2000年夏の気温分布測定では、にじみ出し発生時、御苑内では低地となっている池周辺と芝生広場が相対的に低温となっていることがわかった。御苑内の観測点を芝生地の地点と樹冠下の地点でグルーピングすると、日中のクールアイランド強度は樹冠下の方が大きくなるが、夜間は逆に芝生地でクールアイランド強度が大きくなった。また、夜間の表面温度分布をサーモカメラによる熱画像で確認した結果、樹冠部よりも芝生表面の方が相対的に低温であることが確認された。

図-8は、夜間について、樹冠下と芝生面との気温差の時間変化を示したもので、図中には下向き長波放射量と風速の変化を併示した。下向き長波放射量は、天空が曇ると大きな値となる。図では、午前0時頃と1時頃、さらに3時から4時にかけての時間帯に雲に覆われており、このとき気温差が小さくなっている。一方、天空が晴れている時間帯でも、21時頃、23時過ぎなど、風速が一時的に強まる

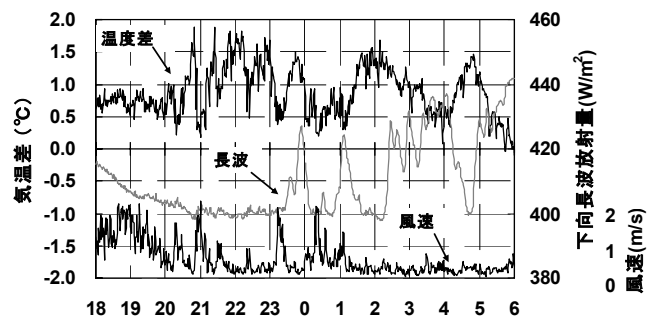


図-8 樹冠下と芝生上の気温差と気象要素の関係

とやはり気温差が小さくなっている。以上のことは、放射冷却により芝生面上で冷気が生成され、それによって生じた気温差が一時的な強風で攪拌され、気温差が解消されていると解釈できる。

このように、御苑では主に樹林地よりも芝生広場が冷気生成に寄与していると考えられる。御苑は地形的には比較的平坦ではあるが、それでも最も広い中央部の芝生広場と南側の境界の間には、池が連なる比高6m程度の窪地が存在する。芝生広場で生成された冷気は、本当にこの窪地を越えて南側境界に達しているのだろうか？この疑問に答えるため、2002年夏には数本の熱電対アレイを御苑内に設置し、御苑内部での冷気の蓄積の様子とその動きを追った。熱電対アレイは各々約200mの長さで、20m毎に細杭を立て0.9mの高さの気温を測定した。また、窪地内と芝生広場には高さ6mの測定ポールを立て気温鉛直分布を把握した。さらに南側境界部には高さ11mの簡易鉄塔を立て、気温の鉛直分布と2高度での超音波風速温度計による風向・風速と気温の観測を行った。

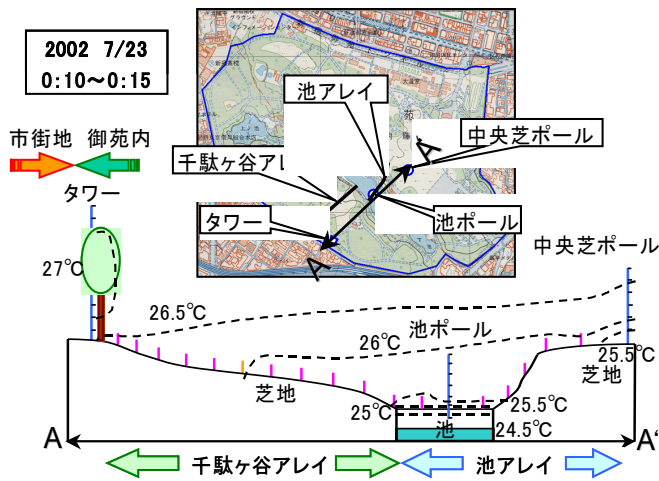


図-9 断面で見たにじみ出し発生時の冷気の蓄積状況

図-9は、その結果の一部で、南側境界で「にじみ出し」が発生した直後の状況を示している。なお、図では高さ方向を水平の10倍のスケールで強調して地形を表現している。窪地内には芝生表面よりも低温の空気が蓄積しており、これ以前の時間変化を追うと、図右側の中央芝生広場で生成された冷気が窪地に流れ込み、窪地を埋めた後に厚みを増し、最終的に図左端の南側境界に達している状況が確認された。

以上の結果を総合すると、冷気のにじみ出しは、晴天かつ静穏な夜間、放射冷却により御苑内に冷気が蓄積され、その冷気が周辺市街地へ重力流的にあふれ出る現象であることが明らかとなった(図-10)。

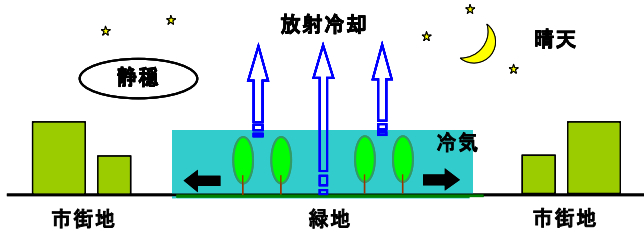


図-10 冷気のにじみ出し現象の模式図

図-2の示したように、にじみ出し現象が発生している夜は、クールアイランド強度が大きくなる。それでは、このような夜は御苑が周辺市街地を冷却しているといえるのであろうか。図-11は、2000年の観測における中央芝生広場における熱収支観測の結果の一部である。ここでは、「にじみ出し」が発生した8/4~8/5と、晴天ではあったが夜間を通して1m/s以上の風が吹き「にじみ出し」が発生しなかった7/31~8/1の2例を比較した。御苑内の気温は、にじみ出しの夜の方が明らかに下がっているが、この夜、渦相関法で評価した顕熱フラックスはほぼゼロである。一方、風が止まなかった夜は、御苑内の気温低下は弱いものの、夜間を通して40W/m²程度の負の顕熱フラックスが観測された。このことから、周辺大気の冷却という観点からは、

にじみ出しが起こらなかった夜の方が貢献しているといえる。逆に言えば、にじみ出し発生夜は、静穏で、御苑内に接地逆転層が形成されるため、地上付近の気温は非常に低下するが、安定成層となるため乱流拡散は抑えられ、周辺大気の冷却作用は期待できない。すなわち、周囲に冷気を拡散させずに御苑内に冷気を蓄積するが故に「にじみ出し現象」が発生し、近隣市街地を涼しくすることができる。

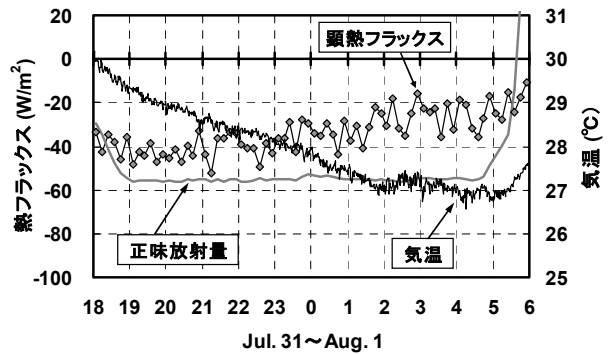
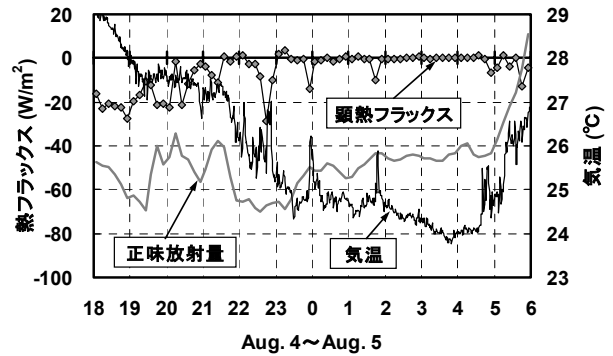


図-11 顕熱フラックスの比較(上:無風時、下:有風時)

5. 移動観測による市街地平均気温の把握

最後に、クールアイランド強度算出の基準となる市街地平均気温を自動車による移動観測から求めた試みについて紹介する³⁾。先に述べたように、緑地のクールアイランド強度を求める上で最も問題となるのは、空間的な変動が大きい市街地側の代表気温をどう定義するかである。2002年の観測では、一つの試みとして、自動車による移動観測を実施し市街地代表気温を求めた。

移動観測ルートは新宿御苑を囲むように回るコースで、市街地内の街路幅、方位、天空率の異なる様々な街路を含むように選定した(図-12)。日中は1時間毎、夜間は3時間毎に周回し1秒間隔の気温データから平均気温を算出した。平均所要時間は約25分であった。

図-13は、御苑内の気温として図-12の星印の地上2m気温を用い、移動観測時間と同時のデータを切り出してクールアイランド強度を算出した結果である。最高気温時の値は2.5°C程度と図-2よりやや大きくなっている。なお、観測実施期間で「にじみ出し」が出現したのは7/23の早朝のみで、このときの気温差は3.3°Cであった。



図-12 市街地平均気温算出のための移動観測ルート

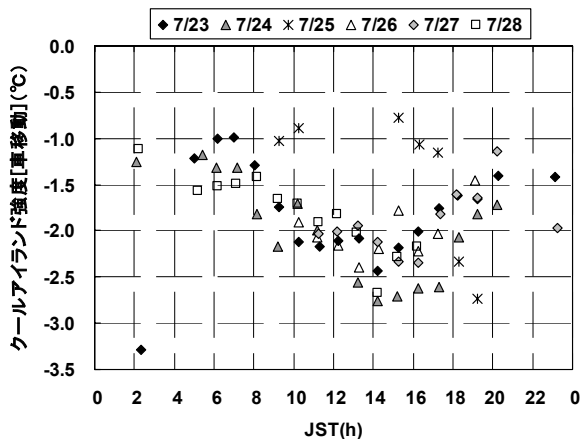


図-13 移動観測による市街地平均気温を用いたCI強度

まとめ

新宿御苑を例に、都市内大規模緑地におけるクールアイランドの実態について報告した。紙面の都合で、気温差の季節変化⁶⁾、熱収支と体感評価⁵⁾などについては触れられなかった。各文献をご覧願いたい。夜間のにじみ出し現象については、その後の研究で皇居をはじめ日比谷公園、芝公園など多くの緑地で確認された。また小規模の斜面緑地や住棟間が緑化された住宅団地などでも観測されている。現在、出現のための緑地の最小スケールや、緑地内の被覆構成との関連などについて、さらに研究を継続している。

参考文献

- 丸田頼一：公園緑地の都市自然環境におよぼす影響，都市計画 69,70 (1972)，49-77
- 本條 毅・菅原広史・三上岳彦・成田健一・桑田直也：新宿御苑のクールアイランド効果の実測，環境情報科学論文集，

No.14 (2000)，273-278

- 高野武将・成田健一・三上岳彦・菅原広史・本條 毅：街路空間における放射量と温度の空間平均と変動—新宿御苑周辺市街地を例として，環境情報科学論文集，17 (2003)，47-52
- 成田健一・三上岳彦・菅原広史・本條 毅・木村圭司・桑田直也：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(2004)，403-420+口絵
- 成田健一・三上岳彦・菅原広史・本條 毅：新宿御苑における蒸発効率と温熱環境の実測，環境情報科学論文集，18 (2004)，253-258
- 菅原広史・成田健一・三上岳彦・本條 毅・石井康一郎：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 (2006)，393-404
- 永谷 結・梅木 清・本條 毅・菅原広史・成田健一・三上岳彦：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 (2007)，507-512
- 永谷 結・梅木 清・本條 毅・菅原広史・成田健一・三上岳彦：新宿御苑における冷気移動の解析，農業気象，64-4 (2008)，281-288

Cool-island Phenomena in Shinjyuku-Gyoen Park

Ken-ichi Narita

Synopsis In this paper, we show the results of micro-climatological observations performed in and around large park "Shinjyuku-Gyoen Park." In clear calm night, flow-out wind directions from green space to surrounding area were discerned at all measuring points along boundary. These imply the accumulation of cold air mass in the park and its gravitational flow-out into surrounding area. During seeping-out phenomena appeared, cool-island intensity becomes large, but sensible heat flux is almost zero. That means, cooling ability of the park is not directly related with cool-island intensity.

*Nippon Institute of Technology, Member



1956年東京生まれ。1979年広島大学総合科学部総合科学科卒業、86年同大学院工学研究科博士課程単位取得退学。工学博士。広島大学助教を経て、現在、日本工業大学工学部建築学科教授。専門分野は都市環境工学、特に都市緑地からの冷気のにじみ出し現象、河川や街路の「風の道」効果、そのほか屋上緑化や緑のカーテン、保水性舗装など、ヒートアイランド緩和施策の評価に取り組んでいる。