

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

菅原 広史^{*1}・成田 健一^{*2}・三上 岳彦^{*3}
本條 毅^{*4}・石井 康一郎^{*5}

要 旨

クールアイランド強度(都市内緑地とその周囲の市街地との気温差)の季節変化および気象条件への依存性について、都内の大規模緑地(新宿御苑)での実測データをもとに検討を行った。本研究では夜間のクールアイランド現象を中心に議論した。新宿御苑内、市街地それぞれでの気温の空間偏差はクールアイランド強度と同オーダーであった。このためクールアイランド強度の絶対値については、観測地点のとりかたによって大きく異なる。クールアイランド強度の季節変化は、日中のそれは夏に大きく冬に小さかった。これは植物の落葉・展葉が原因と考えられる。一方で夜間のクールアイランド強度はほとんど季節変化しなかった。また、季節を問わず、夜間のクールアイランド強度は大気安定度に依存し、安定であるほどクールアイランド強度は大きい。さらに、放射冷却が強い夜間にもクールアイランド強度が大きくなることが定量的に示された。

1. 研究の背景と目的

都市の中に存在する公園緑地では周辺市街地よりも気温が数°C程度低温になる。この現象はクールアイランド現象と呼ばれ、古くは福井(1956)や丸田(1972)の報告がある。従来のクールアイランドに関する研究(丸田, 1972; 浜田・三上, 1994; 神田ほか, 1997; 本條ほか, 1998; 成田ほか, 2004)を整理すると、市街地と緑地の気温差(クールアイランド強度)はおおよそ数°Cで、風の弱い夜間に大きくなる傾向がある。また、特に静穏な夜間には冷気が緑地から周辺市街地へ発散的に流出する冷気のにじみだし現象が報告されている。浜田・三上(1994)は緑地が芝生か樹林かによって気温差の絶対値、日変化が異なることを示している。

また、日中のクールアイランド強度はどの日もおおよそ同じ値をとるのに対して、夜間のそれは日々大きく異なっている(成田ほか, 2004)。これらはクールアイランド現象が緑地の形態(植生種や規模など)、および気象条件(特に夜間)に強く影響されることを意味している。

しかしながらこれらの知見は夏期の測定結果に基づくものがほとんどであり、他の季節について検討した研究は丸田(1972)や Narita(1997)のみで非常に少ない。特に冬のクールアイランド強度についてはほとんど検討された例がない。近年、都市内での緑地や水面の面積を増やすことで夏季の暑熱環境を緩和する方法(成田, 2003; 浜田・鈴木, 1996)が具体的に検討されている。恒常的な緑地を増やすことを議論する際には、夏季ばかりではなく年間を通じた環境影響について検討する必要がある。

一方、従来の研究は現象の記述に重きがおかれており、クールアイランドの形成要因やどのような気象条件下で気温差が大きくなるのかといった、気象学的メカニズムの視点からの検討は必ずしも十分になされていなかった。クールアイランド形成のメカニズムに着

*1 防衛大学校地球海洋学科, hiros@nda.ac.jp

*2 日本工業大学建築学科,

*3 首都大学東京都市環境学部,

*4 千葉大学園芸学部,

*5 東京都環境科学研究所基盤研究部,

—2005年9月1日受領—

—2006年2月27日受理—

目した数少ない研究としては、Sproken-Smith and Oke (1999) による室内実験があげられる。彼らは緑地を模擬した模型により、天空率や地面の比熱・熱伝導率などが地表面温度でみたクールアイランド強度に与える影響を評価している。また、一晚の事例解析ではあるが、成田ほか (2004) は下向き長波放射量や風速の時間変化に対応して放射冷却の強さに差異が生まれ、緑地内の気温分布が変化したことを示している。これらの研究を除けば、たとえば大気安定度や下向き長波放射量を用いた定量的な評価はほとんどおらず、クールアイランド強度は風の弱い晴れた夜に大きくなる、という経験則が実測において定量的に証明されたことはなかった。

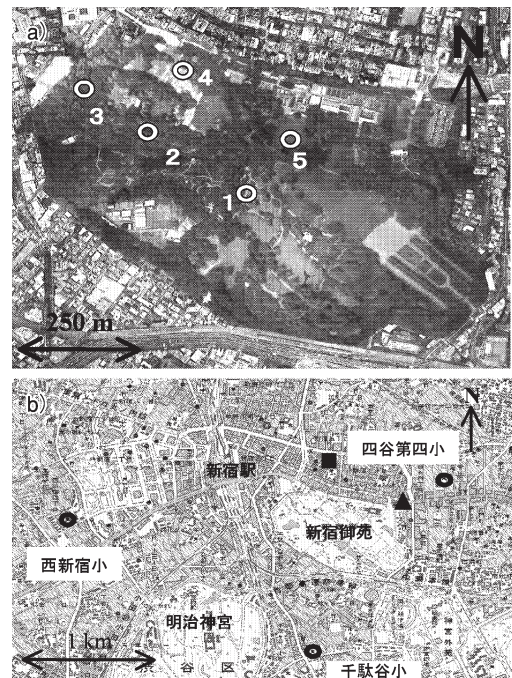
そこで本研究では都市内緑地において、約1年間にわたる気温の長期測定を行い、①クールアイランド強度の季節変化と、②気象条件によるクールアイランド強度の変化について議論する。クールアイランド強度を議論する際には観測地点の選択が大きな問題となるので、本研究では気温の空間代表性についての検討にも重きを置く。なお、クールアイランドという用語は、建物による日陰などにより都心部が周辺よりも低温となる現象 (例えば Yamashita, 1990; Watanabe, 1990; 近藤・開発, 1995) を指すこともあるが、ここでは緑地のクールアイランド現象を単にクールアイランド現象と呼ぶことにする。

2. 観測

観測を行った新宿御苑 (以下、御苑) は東京都新宿区および渋谷区にまたがる広さ58.3 haの大規模緑地であり、環境省が管理する国民公園のうちのひとつである。御苑内の土地被覆は主に芝生および平均樹高15 m程度の樹林である。御苑内の植生は一部の栽培種を除いてすべて雨水灌水で生育している。以下では単に緑地と記した場合は新宿御苑を指すものとする。

気温の観測は御苑内の5箇所 (第1図および第1表) で行った。これらの地点においてロガー付き温湿度計 (佐藤計量器製作所製) を自作の自然通風シェルターに格納し、樹木の幹の地上1.5 mの位置に設置した。この5地点は成田ほか (2004) による御苑内の夏の気温分布図をもとに、5地点の平均値が、気温コンターから推測される御苑の代表値にできるだけ近くなるように定めた。具体的には、まず比較的低温であった樹林帯 (第1表の地点3) と芝生エリア (地点5) に観測点を置き、御苑の土地被覆を代表するような3地点を加え

た。これらの地点では冬にはほとんどの樹木が落葉し、落葉のピークはおよそ11月下旬、展葉は5月上旬がピークであった。観測期間は2002年7月29日から2003年9月10日である。計測間隔は10分とし、1か月に1度データ回収を行った。データ回収の際には測器間での器差が変化していないかどうか確認している。なお、相対湿度については計測中にセンサーが著しく劣化したため、解析には使用しなかった。



第1図 a) 観測地点の配置。図中の地点番号は第1表と対応する。図中黒三角が四谷特別出張所、黒四角が (株) ライフビジネスウェザーによる観測点。b) は国土地理院発行の25000分の1地形図をもとに作製した。

第1表 御苑内の気温測定地点。番号は第1図の地点番号。

番号	周辺状況
1	御苑中央の芝生広場と御苑西側の樹林帯の境界付近。温度計は樹高約3 mの落葉樹に固定。
2	平均樹高約14 mの落葉樹林。一部常緑樹がある。
3	平均樹高約20 mの落葉樹林で樹冠部のみ葉がある。
4	芝生と樹林帯の境界付近。平均樹高約4 m。
5	芝生。温度計は樹高約2 mの落葉樹単木に固定。

クールアイランド強度 (cool island intensity, 以下 CII と略すこともある) は市街地気温マイナス緑地気温とした。緑地気温は第 1 表にあげた 5 地点での平均値とした。市街地の気温は次のように求めた。一般に市街地の地上気温は空間偏差が非常に大きい (大橋ほか, 2003; Narita, 1997; 菅原ほか, 2005; 高野ほか, 2003)。このためクールアイランド強度 (およびヒートアイランド強度) は気温の測定地点の選択に大きく依存する (Grimmond *et al.*, 1993; 榊原, 1994; Sugawara *et al.*, 2004; 菅原ほか, 2005)。ここでは緑地に対してレファレンスとなるような空間代表性のある市街地気温データを得るために、地点の選択には次の 2 点が重要である。ひとつにはセンサーのごく近傍 (数 m 以内) に、空調室外機などの人工排熱源が無いこと、2 番目にはできるだけ多くの地点で測定された値を平均して使用することである。まず 1 番目の条件に関して、本研究では東京都による特別観測網 (METROS) のデータを使用した。この計測はヒートアイランド現象の実態把握のために 2002~2005 年の間行われた (安藤ほか, 2003)。地上気温の測定が、計測時間間隔 10 分で都内計 100 箇所において行われている (METROS 100)。また、都市キャノピー層より上空の風を捉えるため、ビルの屋上など 20 箇所において、風向風速、気温湿度、気圧、降水量の測定が、同様に計測間隔 10 分で行われている (METROS 20)。地上気温の測定では全ての地点で小学校の敷地内の百葉箱を使用している。温度計の通風が強制通風ではないため日中の温度が高めに計測されてしまうという問題点はあるが (安藤ほか, 2003)、気象観測に適した場所が非常に少ない都心において多地点かつ比較的均質な条件で計測されている貴重なデータであろう。本研究では御苑周辺に設置された計 3 点 (西新宿小学校、四谷第四小学校、千駄ヶ谷小学校) のデータを平均して使用した。これら 3 地点は御苑を取り囲むように分布している。前述の 2 番目の条件に関して 3 地点で十分かという問題はあるが、これ以上地点数を増やせば御苑からの距離が遠く、風速などの気象条件が異なる地点を平均に含めることになる。本研究では緑地と市街地との気温差を議論するため、できるだけ御苑周辺での計測値を使用するのがよいと考え、この 3 地点を採用した。この 3 地点での平均気温をクールアイランド強度の算定において市街地気温とした。地点 A (西新宿小) の気温が年間を通しておよそ 0.3°C ほど他 2 地点よりも低温であった他は、地点特有の顕著な特徴は無かった。

本研究では、市街地・緑地ともに自然通風式のセンサーで気温を測定している。先に述べたように自然通風式では、強制通風式に比べて日中は気温が高めに、また夜間は低めに計測される (近藤, 1982)。安藤ほか (2003) は自然通風式センサーで測定した気温と強制通風式によるそれを比較して、この日中の日射加熱による誤差を約 1.2°C、夜間の誤差は約 -0.6°C と見積もっている。しかし、この誤差の大きさは自然通風式センサー周囲の放射環境 (例えば日射の当たり具合) に依存する。また、仮に市街地と緑地でセンサー周囲の放射環境が同じであれば、この誤差はクールアイランド強度を算出する際にはキャンセルされる。したがってごく荒い推定でしかないが、本研究でのクールアイランド強度に対する、自然通風センサーを使ったことによる誤差は、安藤ほか (2003) が提示した 1.2°C (日中)、あるいは 0.6°C (夜間) 程度と考えられる。

本研究では大気安定度の指標としてバルクリチャーードソン数 R_b を使用する。

$$R_b = \frac{gz}{\theta} \times \frac{\theta - \theta_s}{U^2} \quad (1)$$

θ , θ_s , U はそれぞれ、上空気温、地表面温度 (ここでは地上気温を使用)、上空風速である。 g は重力加速度。 z は上空気温と上空風の測定高度である。 θ_s として緑地気温 (緑地 5 地点の平均) と市街地気温 (市街地 3 地点の平均) の平均値を使用した。 U および θ として、前述の特別観測網 (METROS20) の一部である四谷特別出張所屋上での測定値を使用した。四谷特別出張所は新宿御苑に隣接しており (第 1 図黒三角)、地上高 68.5 m (屋上面から 10 m) の位置で風速の計測が、地上高 60.0 m の位置で気温の計測が行われている。また、この四谷特別出張所での計測が開始されていなかった 2002 年 7~8 月の期間については、(株) ライフビジネスウェザーによる測定値 (新宿御苑より北約 200 m にある高さ約 20 m の建物屋上における計測値、第 1 図の黒四角の位置。風速計および温度計は屋上面から約 8 m の位置) を使用した。いずれのデータについても 10 分値をもとに解析を行った。 θ , θ_s は本来温位であるが、ここでは高度差が 20~60 m 程度と比較的小さいので気温を使用した。以下ではこれら屋上での風速を屋上風速と呼ぶ。

また本研究では、晴れ曇りの違いによる夜間冷却の差を検討するため、最大可能冷却量 (近藤, 1994) を

パラメータとして使用する。最大可能冷却量は放射冷却による一夜の気温低下の最大値を理論的に示したものであり、雲量あるいは下向き長波放射量よりも放射冷却の強さを適切に表す。一般にヒートアイランド強度は放射冷却が強くなる静穏晴天夜間に強くなるが、山添・一ノ瀬(1994)が指摘しているように雲量とヒートアイランド強度の相関は必ずしも良くない。これは下向き長波放射量が雲の高さによっても異なるためである。

ここでは最大可能冷却量 δT_{max} は、夕方の気温 T_o と、夜が無限に続き地表が大気と放射平衡になった時の地表面温度 T_{limt} との差とした。

$$\delta T_{max} = T_o - T_{limt} \quad (2)$$

T_{limt} は下向き長波放射量 L から求められる。

$$T_{limt} = \left(\frac{L}{\sigma} \right)^{1/4} \quad (3)$$

下向き長波放射量は近藤(1994)の式を用いて、夜間平均の地上気温、地上比湿、雲量(いずれも21時から翌日03時までの東京管区気象台での測定値、ただし雲量は21時と03時のもの)から一夜ごとに推定した。雲量は観測原簿をもとに、雲形がCu, Cb, Sc, Stのもの

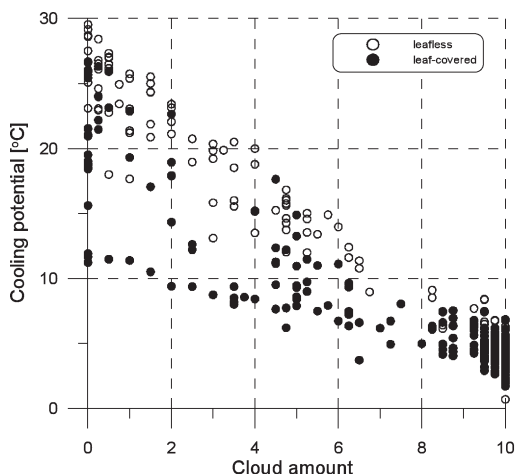
の下層雲として全雲量と下層雲量を算出した。ここで推定している L は、建物壁面や植物からの放射は含めない都市キャノピー上での夜間平均値である。 T_o は日没時刻の気温(市街地と緑地の平均値)を用いた。なお、最大可能冷却量と雲量との対応は、第2図をみると寒候期(leafless)は最大可能冷却量がおよそ10°C以上で晴れ(雲量8割以下)であることがわかる。暖候期(leaf-covered)はおよそ5°C以上で晴れであった。

なお、本研究では無降水日(東京管区気象台で降水が観測されていない日)について、特に夜間を中心に解析した。以下、夜間平均とは21時から翌日03時までの平均、日中平均とは09時から15時までの平均である。

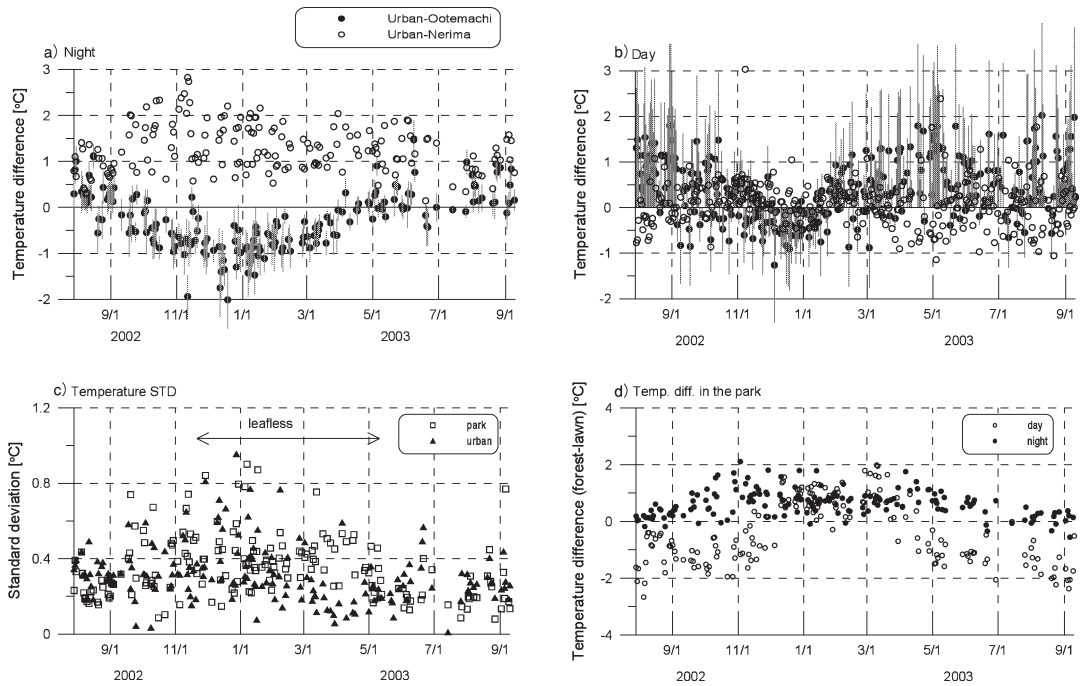
3. 都市気温の空間代表性についての検討

市街地気温として使用する御苑周辺3箇所(3箇所の平均気温(以下、市街地基準気温と呼ぶ))について、その特性を検討する。先にも述べたように都市域は熱的に非常に不均質な場である。したがって空間的に密な測定を行い空間平均気温を求めることが望ましいが、測定点の密度を決定するにはそもそも気温分布の情報が必要であり、理想的な密度で測定を行うことは現実にはほとんど不可能である。そこで、ここでは市街地基準気温を他の測定値と比較し、空間偏差の程度すなわち市街地基準気温の空間代表性を評価する。比較対象はアメダス(東京、練馬)および高野ほか(2003)による御苑周辺での移動観測の結果である。無論、これらの気温が空間平均値である保障はなく、ここでは様々な測定値と比較して空間偏差の大きさを見積もることが目的である。

第3図(a, b)は市街地基準気温とアメダス東京、アメダス練馬との差を示したものである。誤差棒は市街地基準気温を算出した3地点での標準偏差である。日中、夜間ともにアメダスと市街地基準気温との差はクールアイランド強度(第7図)と同程度かそれ以上の大きさとなることが多い。夜間はアメダスとの気温差に比べれば御苑周辺での気温偏差(誤差棒)は小さく、御苑周辺の小スケールで見れば比較的空間偏差が小さい。一方、日中は御苑周辺での偏差が大きく、市街地基準気温とアメダスとの差はこの偏差の範囲内にあることが多い(第3図b)。すなわち、御苑周辺の小スケールで見ても熱的に非常に不均質になっている。日中のこの大きな空間偏差は建物による日向日陰が原因であると考えられる。高野ほか(2003)においても、日



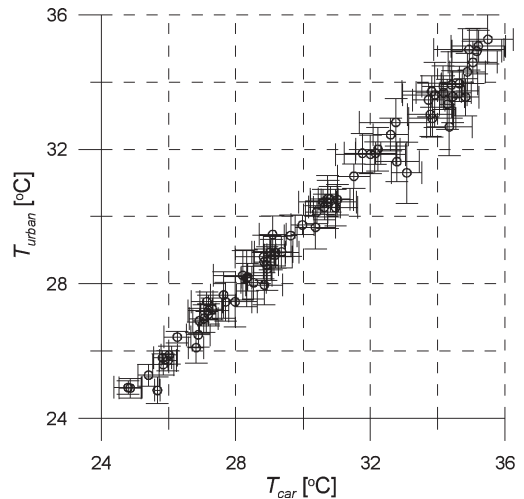
第2図 最大可能冷却量と雲量との関係。雲量は東京管区気象台での測定値。御苑の植物に葉がある時期(着葉期, leaf-covered)と葉が無い時期(非着葉期, leafless)に分けて示した。



第3図 a, b) 市街地基準気温（新宿御苑周辺の3地点平均，図中ではUrban）と比較対照地点（アメダス東京，アメダス練馬）での気温との差。誤差棒は市街地基準気温の3地点の標準偏差であり，アメダス東京との気温差にプロットしてある。夜間（a），日中（b）について示した。c) 市街地基準気温を算出した御苑周辺の3地点，緑地気温を算出した5地点での気温標準偏差。夜間の値についてのみ示した。d) 新宿御苑内の樹林（第1図の地点2および3）と芝生（地点5）での気温差。日中と夜間に分けて示した。a, b, c, d いずれも降水がない日についてのみ示した。

中に大きな気温空間偏差が測定されており，この空間偏差は路面温度（日射量に比例）と正の相関を持つことが示されている。

第3図cには緑地，市街地それぞれでの気温の空間偏差を夜間について示した。偏差は，緑地，市街地いずれも冬に大きい傾向がみられ，最大で1°C程度になる。特に樹林では冬の落葉により天空率が増加し，放射環境が緑地内のどの地点も似たような状況になると考えられるが，緑地内の気温偏差はむしろ冬季の方が大きかった。また，第3図dに示す樹林と芝生の気温差も夜間については冬に大きい。これは冬の大気が安定な日ほど地点ごとの地形や天空率，土地被覆などが気温に強く影響するためであろう。一方，昼間の樹林と芝生の気温差については，樹林での落葉・展葉に対応して夏と冬で正負が反転しており，夏は芝生の方が高温である。なお，第3図aにおいて夜間，アメダス練馬との差がアメダス東京とのそれよりも絶対値が大きく，かつ，ばらついているのは距離の違いによるも



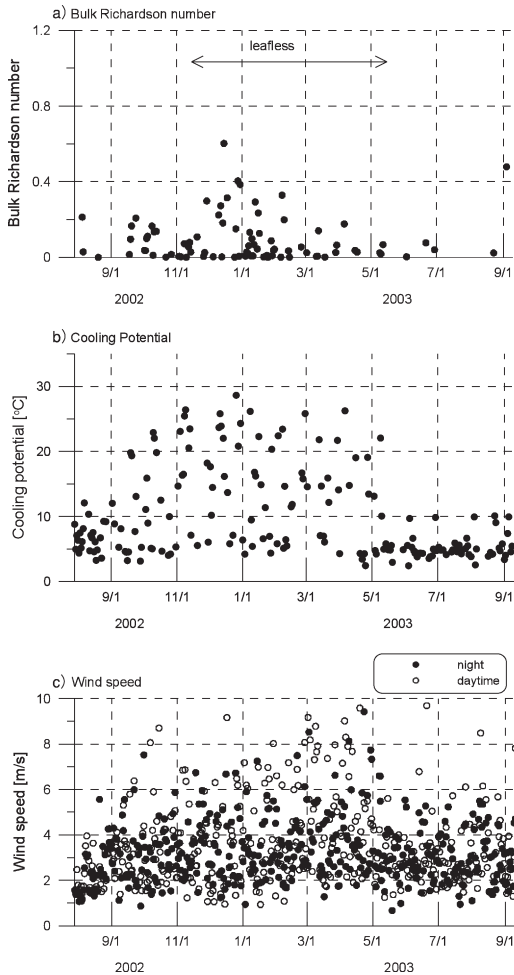
第4図 市街地基準気温（新宿御苑周辺の3地点平均， T_{urban} ）と高野ほか（2003）の移動観測による市街地平均気温（ T_{car} ）の比較。横方向の誤差棒は移動観測内での空間偏差（標準偏差），縦方向の誤差棒は3地点の標準偏差。

のと思われる。新宿御苑からみてアメダス練馬までは約7 km, アメダス東京までは約5 km である。

第4図は高野ほか(2003)による自動車移動観測で得られた市街地平均気温と、本研究での市街地基準気温を比較したものである。高野ほか(2003)の測定コース(全長7 km)は新宿御苑周辺において、街路幅、方位、天空率の異なる道路が含まれるように設定されており、コース巡回時1秒ごとの測定値(約1800データ)を平均している。ただし、道路上での測定であることから、自動車からの排熱のため厳密な意味での空間平均気温よりは高めの値がでていると考えられる。第4図を見ると両者の気温は非常によく一致していることがわかる。差は日中平均で0.51°Cと高野ほか(2003)

の方が高温であり、夜間平均の差は0.01°C以下であった。ここでもやはり、日中の方が不均質であること、逆に夜間は比較的均質であることがわかる。

以上の結果から、御苑周辺市街地での気温の空間偏差は日中に大きく夜間に小さいことがわかる。空間偏差が小さければ、1地点の測定値でも高い精度で空間代表性がある(空間代表値としての誤差が小さい)ことになる。しかし、空間偏差の大小は、解析対象となる気温分布(ここではクールアイランド強度)との大小で評価されるべきものである。第3図、特にcで示した空間偏差は後に示すクールアイランド強度と少なくとも同オーダーであり、ここでは夜間であっても無視できるものではない。

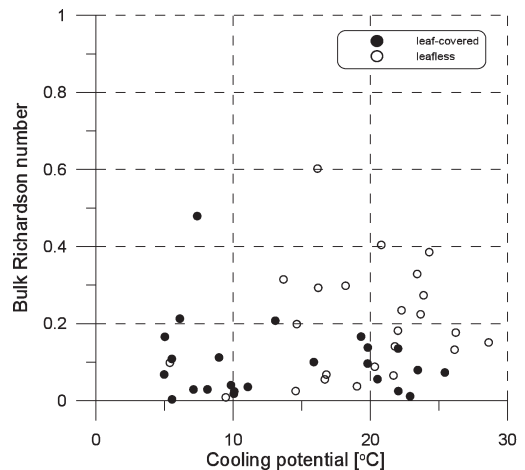


第5図 バルクリチャードソン数(a)、最大可能冷却量(b)、屋上風速(c)の季節変化。

4. クールアイランド強度の季節変化

4.1 大気安定度、最大可能冷却量の季節変化

クールアイランド強度について検討する前に、それに影響する気象条件(大気安定度、最大可能冷却量、風速)の季節変化を検討する(第5図)。大気安定度(バルクリチャードソン数)については夜間平均値を示した。最大可能冷却量が大きな日は冬に多い。またバルクリチャードソン数についても冬に値の大きい(大気が安定な)日が多い。放射冷却により地上気温が低くなれば大気もより安定になるが、バルクリチャードソン数は風速にも依存するため、バルクリチャードソン数と最大可能冷却量の相関は必ずしも明確ではなかつ



第6図 最大可能冷却量とバルクリチャードソン数との関係。御苑の植物に葉がある時期と無い時期について降水が無い日のみ示した。

た(第6図)。以下ではバルクリチャードソン数と最大可能冷却量を独立なパラメータとして扱う。

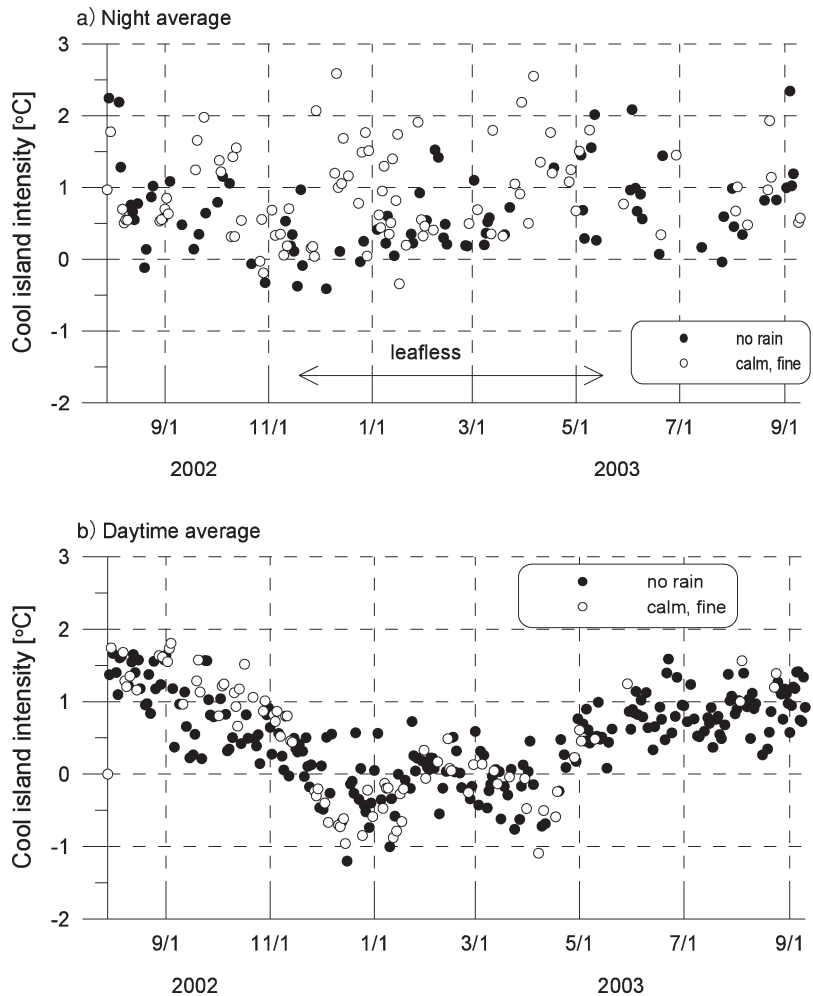
4.2 クールアイランド強度の季節変化

第7図にクールアイランド強度の季節変化を示した。それぞれの図は夜間平均値(a)、日中の平均値(b)について示し、無降水日と無降水かつ弱風晴天の日(屋上風速 3 m/s 未満, 東京管区气象台での雲量が5以下の日)でプロットをわけている。新宿御苑のクールアイランド強度は夏の日中におよそ1°C, 夜は0~2°C, 冬の日中は-1~0°C, 夜は0~2°Cである。夜間については季節変化の傾向はあまり明確ではないが、冬にクールアイランド強度が大きな日が若干多くなっている。夜間の最大値について見た場合も同様であった(図略)。これは第5図で示したように大気が安定な日あるいは放射冷却が強い日が冬に多いことに起因していると考えられる。このことは第7図で弱風晴天日の方がクールアイランド強度が大きいくところにもみとれる。大気安定度, 最大可能冷却量とクールアイランド強度が正の相関を持つことは次節で述べる。

一方、日中のクールアイランド強度については夏に大きく冬に小さい傾向が顕著である。これは冬には落葉により植物の葉が日射を遮る日陰効果および植物の蒸発散の効果小さくなるためと考えられる。また冬に緑地の方が高温(負のクールアイランド強度)となっている日がある。これは市街地では建物の日陰が生じる一方で、落葉した緑地では地表面が日向になるためであろう。また第7図の縦軸を、アメダス東京の測定値を市街地気温としたクールアイランド強度とし

た場合でも、同様な季節変化が見られた(図略)。したがって、クールアイランド強度の絶対値はともかく、ここで見られた季節変化は、市街地側の観測地点の選び方に起因したものではなく、ある程度一般性を持った特徴であることがわかる。

クールアイランド強度の絶対値と季節変化をもう少し客観的にとらえるため、ヒートアイランド強度(都市気温マイナス郊外気温)と比較する。ヒートアイランド強度との比をとることで、日々の気象条件の違いをある程度除去したクールアイランド強度の季節変化が議論できる。また、ここでは行っていないが、異なる都市間におけるクールアイランド強度の比較も容易



第7図 クールアイランド強度(市街地気温マイナス緑地気温)の季節変化。a) 夜間の平均値, b) 日中の平均値。それぞれ無降水日(黒丸)と無降水かつ弱風晴天日(白丸)について示した。

になると考えられる。ここでは夜間についてのみ解析を行う。ヒートアイランド強度は郊外地点としてどこを採用するかによって、その値が大きく異なる(Grimmond *et al.*, 1993; 梶原, 1994; Sakakibara and Owa, 2005; 菅原ほか, 2005)。そのためここでは郊外として、久喜, 土浦, 茂原, 海老名のアメダス地点それぞれについてヒートアイランド強度を求めた。また、都市気温はアメダス東京での気温を用いた。これはクールアイランド強度の算出に用いた市街地基準気温(新宿御苑近辺の3地点の平均)とは異なる。それは次の2つの理由からである。ひとつは既往研究や今後の他都市での研究との比較を容易にするためである。もうひとつはアメダスの気温計測は強制通風式であるのに対して、METROSのそれは自然通風式なので、測定方法の違いによるバイアス(安藤ほか, 2003)がヒートアイランド強度に含まれるのを防ぐためである。

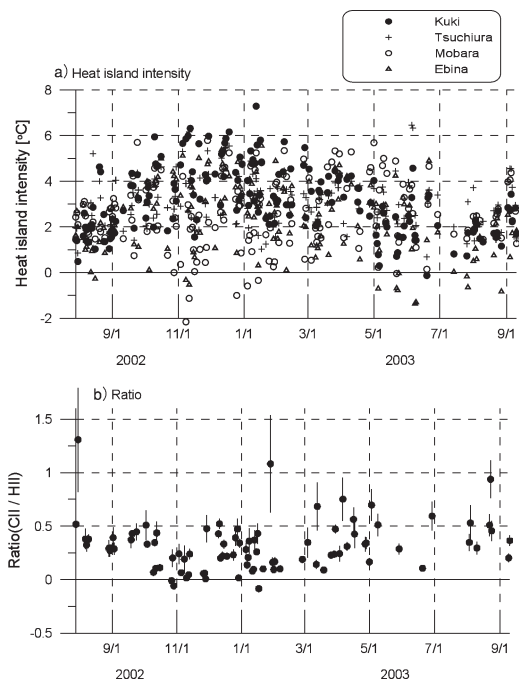
第8図aはヒートアイランド強度を弱風晴天夜間について示したものである。比較のため、近年の既往研究で示された東京のヒートアイランド強度を挙げてみよう。朴(1987)の第1図によると東京の値は約8°Cと読み取れる。これは郊外地点や測定方法が明記されていないが、既往研究の精査により秋～冬の季節に3回以上観測が行われた観測結果を引用したのものであると述べられている。Yamashita(1990)は青梅を郊外として1978～1983年の平均値を求め、12月に5°C以上のヒートアイランド強度が得られたことを述べている。野口(1994)は関東、南東北、北陸、中国地方における都市化されていない気象官署を郊外地点とし、冬の日最低気温でのヒートアイランド強度の経年変化を示している。それによれば1990年ごろには1～1.5°Cの値が示されている。山添・一ノ瀬(1994)は本研究と同様にアメダスを用いて算出し、アメダス東京を都市代表地点、熊谷、船橋、府中をそれぞれ郊外代表地点としておよそ2.0～4.5°Cを示している。第8図aでのヒートアイランド強度はこれら既往研究よりも同程度か、小さめの値であることがわかる。これは第8図が降水の有無だけを条件として対象日を抽出していることもあるが、比較的近郊の地点を郊外地点に選んでいること、夜間平均値を使っていることが影響していると思われる。

クールアイランド強度とヒートアイランド強度の比をとると、前者は後者の0.2～0.5倍程度であった(第8図b)。比は冬に小さく、夏に大きい傾向がみられる。第7図と合わせてみれば、この傾向はヒートアイラン

ド強度がクールアイランド強度よりも大きな季節変化を持つために現れたものであることがわかる。

なお、ヒートアイランド強度は夏に地点間の偏差が大きくなるが、これは第3図cでみられた新宿御苑近辺での空間偏差の傾向とは逆である。茂原や土浦のような比較的海岸近くの地点においてヒートアイランド強度が大きくなっていることから、海風の影響により海岸からの距離によって気温が異なることが原因であると考えられる。藤部(1993)も夏の関東の気温分布は海風の影響を強く受けることを示している。また茂原を用いたヒートアイランド強度は冬に小さくなる日がある。アメダスの風と気温分布を見ると、これらの日には房総半島にメソスケールの局地前線が見られ、茂原はこの前線の暖域側であった。

前述のように、ヒートアイランド強度は都市、郊外



第8図 ヒートアイランド強度(a)およびクールアイランド強度CIIとヒートアイランド強度HIIの比(b)の季節変化。郊外地点はアメダス久喜, 土浦, 茂原, 海老名。都市地点はアメダス東京。弱風晴天夜間の平均値について示した。ヒートアイランド強度は都市気温マイナス郊外気温である。(b)の誤差棒は(a)に示した複数のヒートアイランド強度による標準偏差である。

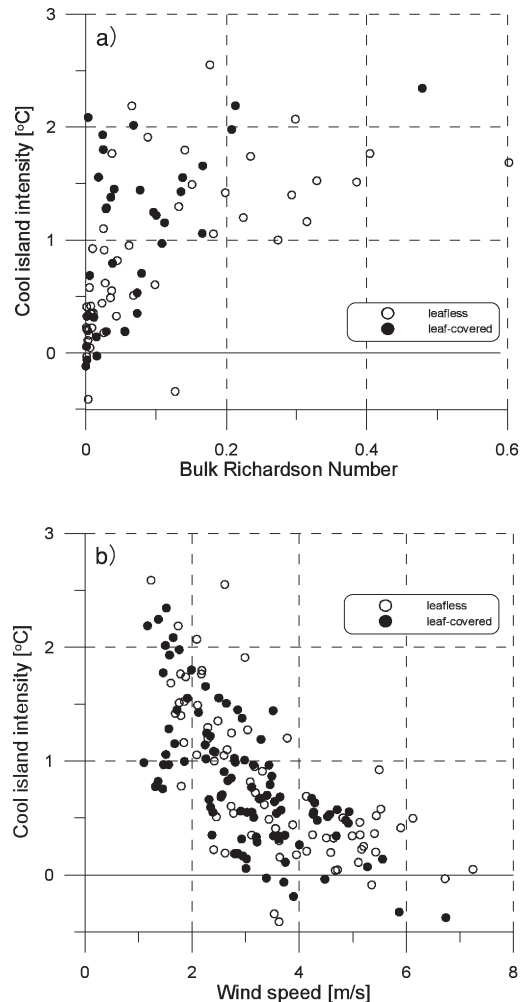
それぞれの気温測定地点の選択や統計の取り方により異なった値が算出される。この問題に関して、ヒートアイランド強度の統一された定義はこれまでのところない。したがって、ヒートアイランド強度（しいては第8図bの強度比）は数値そのものだけでは意味がなく、最低限、それを算出した地点を併記して議論する必要がある。

5. クールアイランド強度の気象条件への依存性

第9図は大気安定度（バルクリチャードソン数）および屋上風速とクールアイランド強度の関係を夜間について見たものである。御苑の植物に葉がある時期と無い時期にわけて示した。いずれの時期についても大気が安定なほど、あるいは風が弱いほどクールアイランド強度は大きくなることからわかる。葉の有無は樹林の天空率やキャノピーの熱容量、キャノピー内の風通しなどを通して、樹林での熱収支に影響すると考えられるが、葉の有無でプロットの傾きはほとんど代わらなかった。仮に葉の有無によって風速依存性が変化するのであれば、緑地・市街地での熱収支パラメータの差異が弱風時に顕著になることで、この風速依存性が生じたと考えることができる。しかし、ここではそうなっていないので、第9図bの風速依存性は、移流によって緑地と市街地との気温差が小さくなるために生じたと考えられる。あるいは、そもそも御苑については、林床での気温が芝地から樹林帯への冷気の移流（成田ほか、2004）によって決定されているために、葉の有無でプロットが分離しなかったとも考えられる。

第10図には日中のクールアイランドについて、風速との関係を示した。葉がある時期と無い時期ではクールアイランド強度の絶対値に違いがあるためプロットが明確に分離されているが、いずれも風速が強いほどクールアイランド強度はゼロに近づく傾向がある。

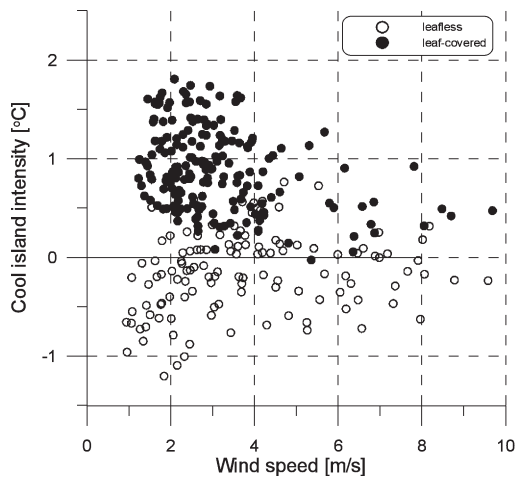
丸田（1972）は弱風晴天の夜間にクールアイランド強度が大きくなることを指摘している。弱風の条件については第9図bで確認したので、晴れ曇りとクールアイランド強度との関係について検討する。第11図は最大可能冷却量と夜間の平均クールアイランド強度の関係を示したものである。屋上風速3 m/s未満のデータについて示した。最大可能冷却量とクールアイランド強度は正の相関をもっており、晴れて放射冷却が強くなる時にクールアイランド強度も大きくなることからわかる。このことは、クールアイランド現象が市街地と緑地での放射冷却の差で生じていることを意味す



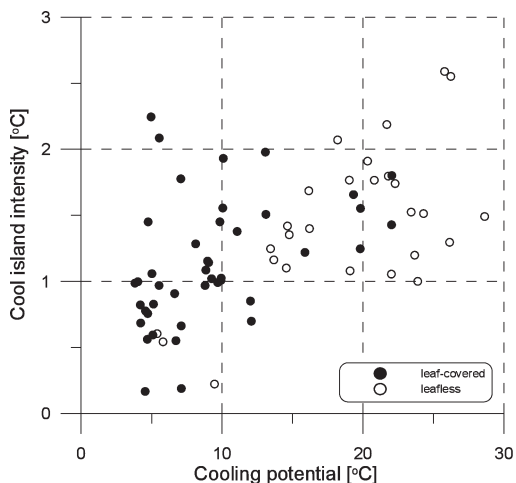
第9図 バルクリチャードソン数 (a) および屋上風速 (b) とクールアイランド強度の関係 (夜間)。御苑の植物が落葉している時期と葉がある時期でプロットを分けた。

る。従来の研究(例えば丸田, 1972; 浜田・三上, 1994)では雲量を参照データとして、晴れた夜間にクールアイランド強度が大きくなる、といった議論が主であった。本研究では放射冷却の強度とクールアイランド強度の関係を、最大可能冷却量を用いることでより定量的に示すことができた。

夜間のクールアイランド強度はあまり明確な季節変化を示さなかったが、大きい値をとる日が冬に若干多いようにみられた(第7図)。一方、クールアイランド強度が大きい日は大気が安定あるいは最大可能冷却量が高い日である(第9, 11図)。第5図でそのような



第10図 風速とクールアイランド強度の関係（日中）。



第11図 最大可能冷却量とクールアイランド強度（一夜の最大値）との関係。屋上での平均風速 3 m/s 未満の夜について示した。

気象条件の日は冬に多い。したがって、冬に夜間のクールアイランド強度が若干大きくなるのは大気安定度、放射冷却の強度が季節変化することによるものであることがわかる。

また第9, 11図の縦軸を、アメダス東京の測定値を市街地気温としたクールアイランド強度にとった場合でも、同様な気象条件への依存性が見られた（図略）。ただし、プロットのバラツキは第9, 11図より大きい。市街地地点の選び方によらず、クールアイランド強度

にはこのような気象条件（風速、大気安定度、最大可能冷却量）への依存性があった。

クールアイランド強度は市街地と緑地での気温差であり、市街地で排出される人工排熱もクールアイランド現象の原因となる。そこで、クールアイランド強度の平日・休日の差について統計的検定を行ったが、有意水準95%のレベルでは統計的に有意とみなせる差はなかった。また第9, 11図を平日と休日に分けて検討したが、やはり明確な違いはみられなかった。ただし、本研究では約1年間のみのデータを使用しているため、統計的に有意な違いを得るにはデータ数が不足していた可能性が高い。人工排熱の影響の検出については、今後更なるデータの蓄積をもとに検討する必要がある。

6. 結論

都内有数の大規模緑地である新宿御苑を対象として、都市内緑地と市街地との気温差（クールアイランド強度）を約1年間にわたり測定し、クールアイランド強度の季節変化および気象条件への依存性について検討を行った。

特に市街地での気温については測定値の空間代表性を検討した。気温の空間偏差が比較的小さくなる夜間においても、市街地内での空間偏差はクールアイランド強度と同オーダーであった。

新宿御苑でのクールアイランド強度は夏の日中に1°C、夜は最大で2°C、冬の夜間も最大2°C程度であった。ただし、都市域は気温の空間的不均質性が大きいいため、クールアイランド強度の値自体は測定地点のとり方に強く依存する。また、この値は自然通風式のセンサーを用いたことによる誤差も含んでいる。ここでのクールアイランド強度は都心と郊外でのアメダスデータをもとにした東京のヒートアイランド強度1~6°Cと比較すると、0.2~0.5倍に相当する。クールアイランド強度の季節変化は、夜間についてはほとんど見られず、日中は冬に小さくなる季節変化がみられた。冬の日中には新宿御苑の方が高温になる時もあった。このような日中についての季節変化は新宿御苑内での落葉・展葉が原因である。

夜間のクールアイランド強度は季節を問わず大気安定度に依存し、安定であるほどクールアイランド強度も大きいことが示された。また、放射冷却の強度を示す最大可能冷却量とクールアイランド強度は正の相関があった。ここでの最大可能冷却量は夕刻の気温と、

地表面が上空大気と放射平衡になった時の表面温度との差である。このことにより、これまで定性的に述べられてきた、晴れている夜はクールアイランド強度が大きくなる、という経験則が定量的に証明された。夜間のクールアイランド強度の季節変化は放射冷却が強く、また大気が安定となる日が冬に多いことが原因である。以上の季節変化と気象条件への依存性は、クールアイランド強度を算出する際の地点の選び方に起因したものでなかった。

本研究では日中のクールアイランドについては大きく扱わなかったが、これは人間の体感温度との関係を含めて、さらなる研究が必要なテーマである。また、都市内緑地は暑熱環境の緩和以外にも、景観や人間に対する心理的な効果(鄭ほか, 1996)、大気汚染物質の吸収効果(神田ほか, 1997; 田村ほか, 1999)などもあり、都市内緑地の存在意義は幅広い視点での評価が必要であろう。本研究が都市内緑地のより良い姿を見出す一助となることを期待したい。

謝 辞

観測に際しては環境省新宿御苑管理事務所にご協力いただいた。また内藤真幸君、上田由佳さん(防衛大学校)および大谷義人君(東京都立大)には観測作業に協力していただいた。本研究で使用した市街地の気象データは東京都環境科学研究所、首都大学東京および(株)ライフビジネスウェザーより提供していただいた。ここに記して感謝いたします。

参 考 文 献

安藤晴夫, 塩田 勉, 森島 済, 小島茂喜, 石井康一郎, 泉 岳樹, 三上岳彦, 2003: 2002年夏期における都区部の気温分布の特徴について, 東京都環境科学研究所年報, 81-87.

藤部文昭, 1993: 関東平野における春・夏季晴天日の気温分布の日変化, 天気, 40, 759-767.

福井英一郎, 1956: 都市における気温分布と緑地, 都市問題, 47, 50-56.

Grimmond, C. S. B., T. R., Oke and H. A., Cleugh, 1993: The role of "rural" in comparisons of observed suburban-rural flux differences, IAHS Publ., (212), 165-174.

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.

浜田 崇, 鈴木智恵子, 1996: 都市気候に及ぼす緑地・

水面の効果, 生活衛生, 40, 3-11.

本條 毅, 高倉 直, 水谷 敦, 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.

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.

近藤昭彦, 開発一郎, 1995: 広島市市街地におけるランドサットデータによる輝度温度と気温および都市キャノピー層の構造との対応関係, 地学雑誌, 104, 225-238.

近藤純正, 1982: 大気境界層の科学気象学のプロムナード4, 東京堂出版, 219pp.

近藤純正編著, 1994: 水環境の気象学, 朝倉書店, 350pp.

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.

Narita, K., 1997: Annual observation on the temperature field in Hiroshima city. Proc. the Second Japanese-German Meeting, 243-246.

成田健一, 2003: ヒートアイランド対策としての緑地の機能—緑地での冷気生成・分布と都市気候への影響, 緑の読本, (66), 26-31.

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.

野口泰生, 1994: 日最高・最低気温の永年変化に与える都市化の影響, 天気, 41, 123-135.

大橋唯太, 玄地 裕, 亀卦川幸浩, 2003: 東京都心の街区内気温の空間分布とその形成要因について, 環境情報科学論文集, (17), 59-64.

朴 恵淑, 1987: 日本と韓国の諸都市における都市規模とヒートアイランド強度, 地理学評論, 60, 238-250.

榊原保志, 1994: 越谷市に見られるヒートアイランド強度—郊外が水田の場合—, 天気, 41, 515-523.

Sakakibara, Y. and K. Owa, 2005: Urban-rural temperature differences in coastal cities: influence of rural sites, Int. J. Climatol., 25, 811-820.

Spronken-Smith, R. A. and T. R. Oke, 1999: Scale modeling of nocturnal cooling in urban parks, Bound.-Layer Meteor., 93, 297-312.

Sugawara, H., K. Narita and T. Mikami, 2004: Representative air temperature of thermally heterogeneous urban areas using the measured pressure gradient, J. Appl. Meteor., 43, 1168-1179.

菅原広史, 池 東旭, 遠峰菊郎, 2005: ヒートアイランド強度算定のための都市気温分布の検討—ソウル(韓国)の例—, 天気, 52, 119-128.

高野武将, 成田健一, 三上岳彦, 菅原広史, 本條 毅, 2003: 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), 47-52.
- 田村優佳, 吉野 博, 北條祥子, 安田延壽, 佐藤 洋, 佐々木澄, 1999: 都市内緑地の暑熱緩和・大気浄化効果に関する実測調査, 日本建築学会技術報告集, (9), 167-170.
- Watanabe, A., 1990: Observed conditions of heat and cool islands, Sci. Rep. Fukushima Univ., (46), 25-31.
- Yamashita, S., 1990: The urban climate of Tokyo, Geogr. Rev. Japan, **63**, 98-107.
- 山添 謙, 一ノ瀬敏明, 1994: 東京およびその周辺地域における秋季夜間の晴天時と曇天時のヒートアイランド, 地理学評論, **67A**, 551-560.
- 鄭 桴元, 堀越哲美, 福岡真由美, 水谷章夫, 1996: 都市空間における人体への日射熱負荷に緑陰による緩和効果, 人間と生活環境, **3**, 20-28.

Cool Island Intensity in a Large Urban Green : Seasonal Variation and Relationship to Atmospheric Condition

Hirofumi SUGAWARA*¹, Ken-ichi NARITA*², Takehiko MIKAMI*³,
Tsuyoshi HONJO*⁴ and Koichiro ISHII*⁵

*¹ (*Corresponding author*) *Earth and Ocean Sciences/National Defense Academy of Japan, Yokosuka, 239-8686, Japan.*

*² *Dept. Architecture/Nippon Institute of Technology.*

*³ *Urban Environment Sciences/Tokyo Metropolitan Univ.*

*⁴ *Faculty of Horticulture/Chiba University.*

*⁵ *Basic Research Division/Tokyo Metropolitan Research Institute for Environmental Protection.*

(Received 1 September 2005 ; Accepted 27 February 2006)

Abstract

The cool island intensity (CII) on urban green space was investigated in Shinjyuku-Gyoen, that is one of the largest parks in Tokyo. A through-year measurement of ground level air temperature revealed seasonal variation and relationship to the atmospheric condition of CII. The temperature variation in the park and the reference downtown Tokyo was as same order as CII. The daytime CII is larger in summer than that in winter due to the leaf fall of the park trees. On the other hand, seasonal variation of nighttime CII is not so clear. The nighttime CII was large under the stable atmosphere or the strong nocturnal cooling.