

都市内緑地におけるクールアイランドの鉛直構造

菅原 広史* 田中 博春*** 成田 健一***
中野 智子**** 三上 岳彦*****

Vertical Structure of Cool Island in an Urban Green Park

Hirofumi SUGAWARA*, Hiroharu TANAKA***, Ken-ichi NARITA***,
Tomoko NAKANO**** and Takehiko MIKAMI*****

Abstract

Synchronized kite-balloons measurements revealed the development of a nocturnal stable layer in an urban green park. The vertical structure of the park cool island is discussed. A stable layer developed in the park. In the surrounding urban area, neutral stratification was maintained all night. In spite of different weather conditions on the two nights measured, the park stable layer developed up to similar height (50 m). Three temperature profiles measured at a flat area in the park showed similar vertical gradients from surface to tree height (*ca.* 10 m). This means that the horizontal distribution of air temperature measured at the surface level represents the lowest 10 m of the atmospheric boundary layer.

Calm, clear sky conditions triggered the development of a colder layer in the park than the surrounding area. The maximum height of the colder layer was found to be 71 m. The cooling energy for cold air formation over park was estimated to be 5 Wm^{-2} .

Key words : cool island, urban green space, heat budget, urban warming, air temperature

キーワード : クールアイランド, 緑地, 熱収支, 都市温暖化, 気温

I. はじめに

都市内の緑地では、周辺市街地よりも気温が低くなる現象（クールアイランド現象）が存在する。丸田（1972）は複数の公園緑地での実測結果をもとにクールアイランド現象の平均像を述べた。近

年では、例えば浜田・三上（1994）や神田ほか（1997）、成田ほか（2004）、菅原ほか（2006）が詳細な観測を行い、気温差の日変化や季節変化、市街地への冷気流出などを明らかにした。また、Sproken-Smith and Oke（1999）は模型実験により夜間のクールアイランドの形成過程を議論して

* 防衛大学校地球海洋学科

** 首都大学東京大学院都市環境科学研究科

*** 日本工業大学建築学科

+ 現所属：長野県環境保全研究所

++ 現所属：中央大学経済学部

+++ 現所属：帝京大学文学部

* Department of Earth and Ocean Sciences, National Defense Academy of Japan, Yokosuka, 239-8686, Japan

** Graduate School of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University, Hachioji, 192-0397, Japan

*** Department of Architecture, Nippon Institute of Technology, Miyashiro, 345-8501, Japan

+ Present Address: Nagano Environmental Conservation Research Institute, Nagano, 381-0075, Japan

++ Present Address: Faculty of Economics, Chuo University, Hachioji, 192-0393, Japan

+++ Present Address: Faculty of Liberal Arts, Teikyo University, Hachioji, 192-0395, Japan

いる。ただし、このような実験は実現象と物理的に相似になっていないという指摘（酒井ほか、2007）もある。

しかしながらこれまでのほとんどの研究が温度や風の水平分布を議論しており、クールアイランド現象の立体構造は測定が困難であることもあってほとんど明らかにされていない。国内外の研究をみても、おそらく浜田・三上（1994）による代々木公園（東京）での測定が唯一の例であろう。鉛直方向へのクールアイランドの広がりや、その形成過程を議論する上でごく基本的な事項である。同時にそれは、緑地による市街地冷却を定量的に評価する上で必須の情報である。

以上の背景から、本研究では新宿御苑（東京都新宿区）において、緑地内とその周辺市街地の2箇所での気温鉛直プロファイルの同時測定を行った。その結果をもとに夜間のクールアイランドについて（1）鉛直方向への形成過程と、（2）緑地内に蓄積された冷気量の推定を行う。

II. 観 測

測定を行った新宿御苑は都内でも有数の大規模緑地（面積 0.58 km²）である。敷地はその中央の開けた芝生の広場と樹高 10 m 程度の樹林地域から成り立っている。周辺の市街地を含めて地形はほぼ平坦であるが、園内には高度差 8 m 程度の小さな谷がある。北・西側の周辺市街地は平均建物高さが約 43 m の高層ビル街である。一方東・南側は戸建住宅の多いエリアとなっている。

測定は 2005 年の 7、8 月に行った。気温の水平分布測定をこの期間中連続で行い、鉛直分布は 8 月 14～15 日および 8 月 17～18 日の夜間に測定した。

1) 気温鉛直分布の測定

気温の鉛直分布は 2 機の係留気球を用い、緑地内と市街地での同時観測を行った。緑地内は新宿御苑のほぼ中央（図 1 の P 点）にある芝生の広場で測定した。市街地での測定は緑地の北側 230 m の位置にある小学校の校庭（U 点）で行っている。事前に検定を行った自記温度計を複数高度に吊り下げ、同時測定を行った。緑地内では

18 高度、市街地では 16 高度で測定した。測定高度は約 5 m 間隔で、温度傾度が大きいと考えられる下層ほど密にした。データは 10 秒ごとに取得を行い、解析では 10 分平均値を使っている。計測中は風の変化などにより気球高度が変動するため、気球直下にとりつけた気圧センサーにより高度の補正を行っている。

2) 気温水平分布の測定

気温の水平分布を緑地内外の計 90 地点において測定した（図 1 の丸印）。温度計は自記温度計（HIOKI 3632）で自然通風型の放射シールドをつけている。これらを緑地内では樹木に、市街地では街路灯に高さ 2.5 m を基準にして設置した。7 月から 8 月までの連続測定で 2 分ごとのデータ取得を行い、解析では 10 分平均値を使用している。

3) その他の測定

4 成分の放射フラックス（上・下方向の長・短波放射）を緑地中央の芝生上で測定した。また緑地内の樹林において、樹冠下での気温分布を熱電対により測定した（図 1 の S, A, N 地点）。一般風はライフビジネスウェザー（株）による建物屋上（緑地の北 250 m、地上高 28 m）での測定値を使用した。

III. 結 果

図 2、図 3 に緑地内外で係留気球により測定した温位の鉛直分布を示す。14～15 日は終夜雲量 9 以上（東京管区气象台観測）の曇りで、屋上レベルでの風速は 2～3 m/s であった。このため気温はほとんど低下しなかったが、3 時ごろから緑地において急激に安定層が形成された。後述するようにこれは雲の解消によるものだと考えられる。安定層の厚さは 5 時の時点で 55 m であった。一方、17～18 日は晴れで測定期間中の雲量は 2～4、風速は 1～2 m/s と比較的晴天弱風であった。緑地の地上気温は 17 日夕方から翌朝までで約 3℃下がるなど、14～15 日とは気象条件が大きく異なった。しかし、緑地内では 2 時ごろから安定層が形成され、安定層の最大厚さも 14～15 日とほぼ同じ 50 m であった。安定層の強度（温位の鉛直傾度）は 17～18 日は $-0.038^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 、

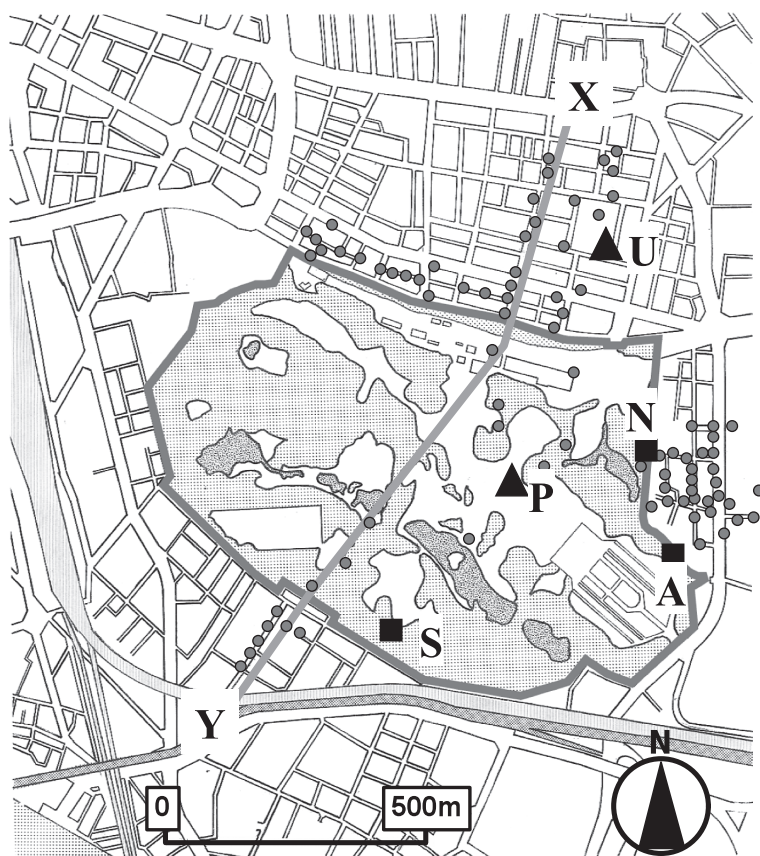


図 1 測定点の配置. 中央の太線で囲ったエリアが新宿御苑である. 黒丸は地上気温の測定地点. 三角 (P と U) が係留気球による気温鉛直分布観測の地点. 四角 (S, N, A) が樹冠下での気温鉛直分布測定点.

Fig. 1 Observation area. The shaded area shows the park (Shinjyuku-gyoen). Filled circles indicate the locations of air temperature measurements at 2.5 m AGL. Filled triangles represent kytoon measurement points (P and U). Filled squares mark the locations of the temperature profile measurements inside the tree canopy.

14～15日は $-0.032^{\circ}\text{C}/\text{m}$ とほぼ同程度であった。気象条件の違いにもかかわらず同じ厚さの安定層がみられた原因は必ずしも明確ではないが、緑地周辺の平均建物高さが43 mと安定層上端とほぼ同じ高さであることから、建物の影響であることが示唆される。都市キャノピー上では風速が強く大気が混合されるために安定層がそれより上方には成長できないと考えられる。また、浜田・三上(1994)による代々木公園での測定例では安定層厚さが60 mであり新宿御苑での値よりも10 mほど高かった。一方、明治神宮を含めた代々木公園の面積は新宿御苑のほぼ2倍であることから、安

定層厚さの緑地面積への依存性は弱いことがうかがえる。

この鉛直分布は緑地中央の天空が開けた芝生で計測されたものであるが、図4をみると15日5時には樹林内でも安定層が形成されていることがわかる。谷地形であるN点を除き、平地のA, S, およびP(中央の芝生)地点では高度10 m程度まで安定層の強度がほぼ一致している。このことから高度10 mでの気温の水平分布は、より下層の地表付近のそれと同じパターンをもつことが推察される。すなわち、平地であれば地上気温の水平分布は10 m程度の厚みをもっていると考えら

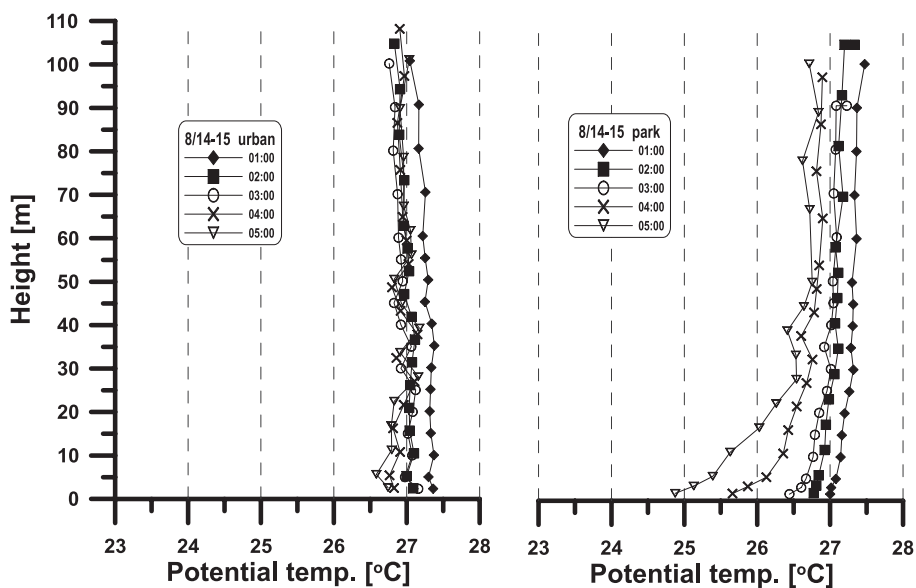


図 2 係留気球で計測された温位分布。緑地内 (右) と市街地 (左)。2005 年 8 月 14 ~ 15 日。

Fig. 2 Potential temperature profile measured by the kytoon systems at points P (park) and U (town) on 14-15 August, 2005.

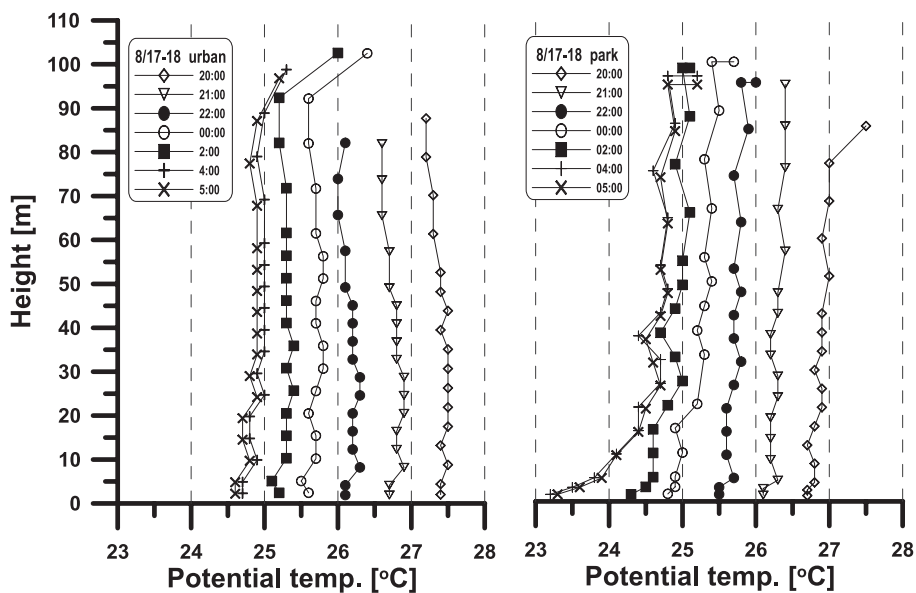


図 3 図 2 に同じ。ただし、2005 年 8 月 17 ~ 18 日。

Fig. 3 Same as Fig. 2 but for 17 to 18 Aug. 2005.

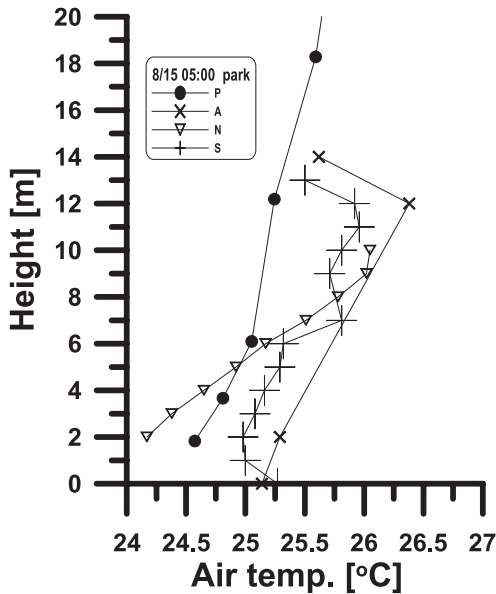


図4 樹林内 (A, N, S 地点) での気温鉛直分布. P は係留気球により緑地中央の広場で計測されたもの. 縦軸は最も標高の低い地点からの絶対値をとっている.

Fig. 4 Air temperature profiles in the park at 05:00 JST. P: above the lawn surface measured by the kytoon system. A, N, and S: below the tree crown in the forest area measured by thermocouples. Vertical axis shows absolute height from the lowest point in the park.

れる。なお、断熱過程で定常であれば気温は水平方向に一樣な分布となるはずである。図4では平地の地点では中央の芝生 (P 地点) が最も低温となっていることから、非一樣な水平分布を維持する非断熱過程として、天空率の大きい芝生での放射冷却が考えられる。また、この樹林内の気温は上層が低温側に折れ曲がった鉛直分布となっている。これは上層部の気温が係留気球による計測値 (図3のP) に近いことから、上空の大気との混合によるものと考えられる。

図2, 図3をみると市街地では両夜とも地上から上空40 mまで大気安定度が中立となっていた。この周辺の平均建物高さは約43 mであることから、建物キャノピー層内において中立成層となっていたことがわかる。この中立成層は都市キャニ

オン内で力学的に形成される循環 (例えば Baik and Kim, 2002 や Sugawara *et al.*, 2008) により形成されたと考えられる。

なお、図3 (17 ~ 18日) の4時以降には市街地でも地表面付近に、ごく薄い安定層 (10 m以下) が形成されている。これは測定を行った小学校の校庭 (約5000 m², 天空率は0.63) で地面の放射冷却により形成されたものだと考えられる。あるいはこの薄い安定層が緑地 (新宿御苑) からの冷氣移流によって形成されたという可能性はないだろうか? この点について確認するため、図5bに14 ~ 15日の気温の水平分布を示した。冷氣移流の範囲は緑地から100 m程度となっており、係留気球観測を行った小学校までは届いていないと考えられる。

次に、安定層の急激な成長がみられた14 ~ 15日について、その成長過程をみてゆく。図5には気温水平分布加えて、温位の鉛直分布、屋上レベルの風速、芝生面の正味放射量の時間変化を示した。鉛直分布をみると冷気の蓄積は3時以降に顕著になっている。これは1時ごろから風速が弱くなったこと、および正味放射量が負の側に大きくなり放射冷却が強くなったことが原因であると考えられる。現地では夜半過ぎに雲が多少薄くなったことが観測されており、正味放射量の変化は雲が原因である。

夜明け後、緑地の冷氣層は急速に解消したが、一方で市街地は中立のまま全層で昇温した。これはやはり建物キャノピー内で鉛直循環が存在し、混合されていることを意味している。

図5aの温位分布を市街地と緑地で比較することで、緑地上に存在する市街地よりも低温な気層 (緑地の冷氣層) が定義できる。緑地の冷氣層は夜明け前に35 m (1 ~ 3時) から71 m (4時) へと急激に成長していることがわかる。この冷氣層に蓄積された冷熱エネルギーの量 Q_g (相対的に高温な市街地との内部熱エネルギーの差, Jm^{-2}) を見積もる。

$$Q_g = \int_0^{Z_i} c_p \rho (T_{park} - T_{town}) dz \quad (1)$$

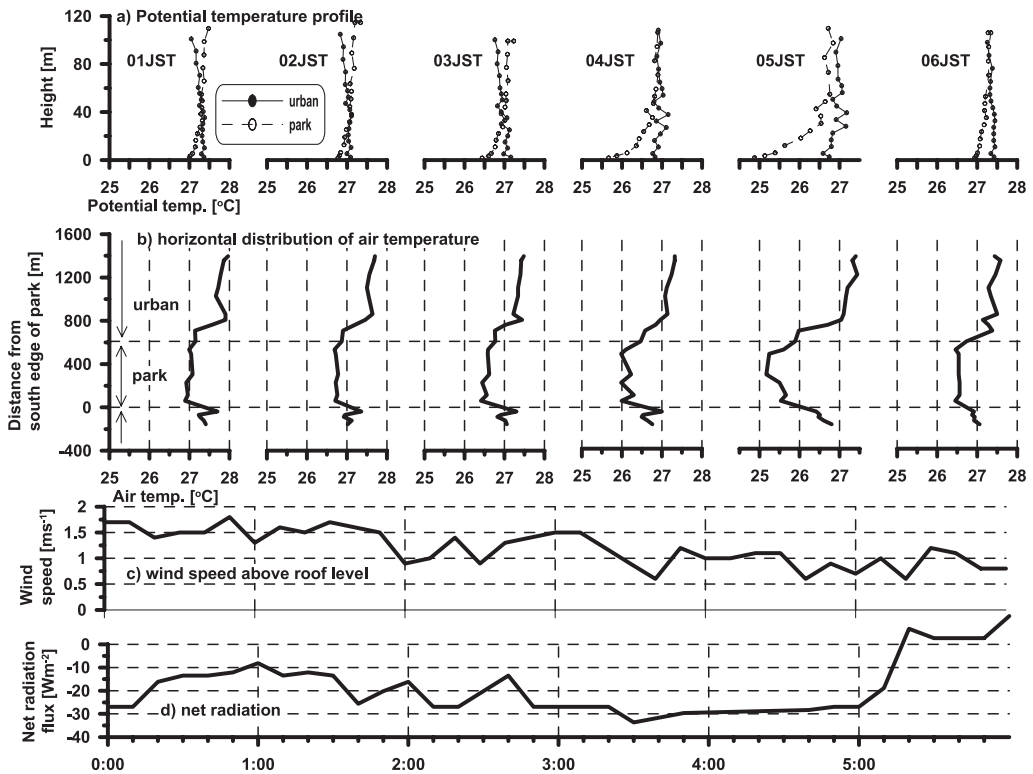


図 5 1時間ごとの温位鉛直分布 (a), 気温水平分布 (b). 水平分布は図1のX,Y間について. (c) 屋上レベルでの風速, (d) 芝生面での正味放射.

Fig. 5 Time series of potential temperature profiles (a), horizontal distribution of air temperature along the line X-Y in Fig. 1 (b), roof-level wind speed (c), and net radiation flux at a lawn surface in the park (d).

表 1 安定層の高度と冷熱エネルギー.

Table 1 Time series of the stable layer height and cooling energy.

時刻 (JST)	1	2	3	4	5
安定層高度 Z_t , m	35	35	35	71	55
冷熱エネルギー Q_g , Jm ⁻²	6893	5099	10207	29682	49903
$\partial Q_g / \partial t$, Wm ⁻²		-0.5	1.4	5.4	5.6

ここで c_p は比熱, ρ は空気密度, T_{town} と T_{park} はそれぞれ市街地と緑地上の気温である。冷氣層の上端高度 Z_t は2つの鉛直分布が交差する高度とした。表1に1時間ごとの Z_t と Q_g を示した。 $\partial Q_g / \partial t$ が単位時間あたりの冷熱蓄積量で、夜明け前に冷氣層が急成長した時で 5 Wm^{-2} である。

凝結がなければ、夜間の気温低下は熱・放射フラックスの発散で決まる。したがって Q_g は市街地と緑地上での熱・放射フラックス発散量の差と等しい。しかし、 5 Wm^{-2} という値は一般的な乱流・放射フラックスの測定精度と同程度であり、渦相関法などのフラックス計測からこの安定層の

形成メカニズムを議論することは困難であることがうかがえる。なお、この Q_g は市街地と緑地との差であり、例えば市街地での人工排熱を含んだ値である。

図4および図5bから、この時の緑地内での気温の水平分布の幅は1℃以内である。そこで緑地内では水平方向に等温と仮定すると、 Q_g に緑地面積 S を掛けた $Q_g S$ が緑地全体での冷熱エネルギーとなる。その時間変化 $\partial Q_g S / \partial t$ は一晩平均で 3.2×10^6 [W] であった。これが緑地（新宿御苑）上に蓄積した冷気量となる。一般家庭で使用されている典型的なエアコンの冷却能力はおよそ1～3 [kW] である。ここでは大きめの平均値として 3.0×10^3 [W] を用いれば、蓄積されている冷気が仮に解放されて市街地を冷却した場合、その冷却能力はエアコン1000台分程度となる。

IV. 結 論

都市内緑地とその周辺市街地において気温の水平・鉛直分布を測定し、夜間のクールアイランドの鉛直構造と形成プロセスを明らかにした。緑地（新宿御苑）では測定を行った2夜とも、安定層が高度約50 mまで形成された。緑地内には開けた芝生の広場や樹林が存在していたが、地形起伏が大きい場所を除いて地表付近の気温鉛直傾度はほぼ等しかった。これは地表付近でみられている気温の水平分布が、樹冠直下程度の高度まで厚みをもっていることを意味している。一方、市街地では建物キャノピー層内外でほぼ中立となっていた。

緑地と市街地との気温差として定義される緑地の冷気層は、最大で高度71 mにまで及んだ。この冷気層は風が弱まり雲が晴れることで形成が促進されていた。冷気層の成長速度を冷熱量に換算すると 5 W m^{-2} となった。

謝 辞

観測に際しては環境省新宿御苑管理事務所の協力を得た。また、係留気球観測には学生諸氏に協力いただいた。査読者の方々からは有益なコメントをいただいた。

文 献

- Baik, J.-J. and Kim, J.-J. (2002): On the escape of pollutants from urban street canyons. *Atmospheric Environment*, **36**, 527-536.
- 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, **67**, 518-529. [Hamada, T. and Mikami, T. (1994): *Geographical Review of Japan*, **67**, 518-529.]
- 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. [Kanda, M., Moriwaki, R., Takayanagi, Y., Yokoyama, H. and Hamada, T. (1997): *Tenki*, **44**, 713-722.]
- 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. [Maruta, Y. (1972): *City Planning Review*, **69/70**, 49-77.]
- 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. [Narita, K., Mikami, T., Sugawara, H., Honjo, T., Kimura, K. and Kuwata, N. (2004): *Geographical Review of Japan*, **77**, 403-420.]
- 酒井 敏・飯澤 功・梅谷和弘・伊藤 文・矢島 新・小野耕作・大西将徳・鈴木尚起 (2007): 夜間のヒートアイランド強度とヒートアイランド循環。日本気象学会春季大会講演予稿集, **91**, C403. [Sakai, S., Iizawa, I., Umetani K., Itou A., Yajima S., Ono, K., Onishi, M. and Amemura, N. (2007): *Proceedings of Japan Meteorological Society Spring Meeting*, **91**, C403.]
- Sproken-Smith, R.A. and Oke, T.R. (1999): Scale modeling of nocturnal cooling in urban parks. *Boundary-Layer Meteorology*, **93**, 287-312.
- 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. [Sugawara, H., Narita, K., Mikami, T., Honjo, T. and Ishii, K. (2006): *Tenki*, **53**, 393-404.]
- Sugawara, H., Hagishima, A., Narita, K., Ogawa, H. and Yamano, M. (2008): Temperature and wind distribution in an E-W-Oriented urban street canyon. *SOLA*, **4**, 53-56.

(2010年8月17日受付, 2010年12月17日受理)