

新宿御苑における冷氣移動の解析

永谷 結*・梅木 清*・本條 毅*・菅原広史**・成田健一***・三上岳彦****

* 千葉大学
** 防衛大学校
*** 日本工業大学
**** 首都大学東京

Analysis of Movement of Cooled Air in Shinjuku Gyoen

Yui NAGATANI*, Kiyoshi UMEKI*, Tsuyoshi HONJO*, Hirofumi SUGAWARA**,
Kenichi NARITA***, and Takehiko MIKAMI****

*Chiba University, 648 Mastudo, Mastudo-shi, 271–8510, Japan

**National Defense Academy of Japan, 1–10–20 Hashirimizu Yokosuka-shi, 239–8686, Japan

***Nippon Institute of Technology, 4–1 Gakuendai, Miyasirocho, Minamisaitama-gun, 345–8501, Japan

****Tokyo Metropolitan University, 1–1 Minamiosawa, Hachioji-shi, 192–0397, Japan

Abstract

The cooling effect of urban green area on the surrounding area has been studied by many researches. Some studies observed seeping-out phenomenon or park breeze where the cooled air in the park flows outward to all direction of urban area. But there have been few studies on the movement of cooled air inside the urban green area when of seeping out phenomenon occur. In this study, we analyzed the movement of cooled air inside the urban green area at calm night and the relation with the seeping out phenomenon. Measurements were done during 23rd, 26th and 27th, July 2002 in Shinjuku-Gyoen Park. Thermocouples were set in 200 m lines with the interval of 20 m. We called these thermocouples as thermocouple array and three thermocouple arrays were set in the park. Two supersonic anemometers were used to measure wind velocity at the north and south edge of the park to detect the seeping out flow. In the analysis, the movement of cooled air was calculated by using cross correlation between pattern where temperatures decrease more than 1K in 10seconds during 120seconds. We chose the points that indicated high cross correlation value more than 0.75 to calculate the velocity of cooled air. Most of velocities of the movement were between 0.1 m/s and 0.2 m/s at all points. At the south part of the park, the movement was measured most frequently. Velocity of the cooled air movement was smaller than the wind velocity measured by supersonic anemometers. Cooled air movements were not observed when the wind velocity was more than 1 m/s.

Key words: Cool island, Cross correlation, Heat island, Seeping out phenomenon, Urban climate.

キーワード: クールアイランド, 相互相関係数, 都市気象, にじみ出し現象, ヒートアイランド

1. はじめに

ヒートアイランド現象は重要な環境問題の一つであり、その対策として、都市緑地の持つ気象緩和効果が注目されている。

静穏な夜間に、周辺の都市部より相対的に低温である

緑地上の冷氣が周辺へ流出する現象をMaruta (1972)は「にじみ出し現象 (Park breeze)」と名付けて、これは都市緑地がヒートアイランド現象を緩和する効果の一つと考えられる。

「にじみ出し現象」の測定例は少ないが、次のような研究が行われている。Eliasson and Upmanis (2000)は2つの大規模公園、SwedenのGoteborgとDenmark

2007年10月9日 受付, 2008年8月7日 受理

の Copenhagen で微気象観測を行い、夜間に気温差に起因して生じる、公園からその周辺へ移動する弱い空気の流れ、すなわち「にじみ出し現象」があることを示した。Thorsson and Eliasson (2003) は Sweden, Goteborg の都心における 10 ha 規模の緑地や駐車場からなるオープンスペースで気温と風向風速の定点観測及び気温の移動観測を行い、「にじみ出し現象」によってオープンスペースから市街地へ向かう空気の流れの速度を示し、「にじみ出し現象」の観察中、平均風速は 0.3 m/s 以下であった。また Narita *et al.* (2004) では、超音波風速計を用いて、「にじみ出し現象」の存在を定量的に把握し、発生時の特徴を明らかにした。通常緑地内で生成された冷気は風下へ移動するが、冷気の「にじみ出し現象」では、緑地の周囲全方向へ冷気が流出するのがその特徴である。さらに Nagatani *et al.* (2007) は、新宿御苑において長期間の微気象観測を行い「にじみ出し現象」の発生頻度が 18 時から翌 6 時に高いことを定量的に示し、発生時の平均風速が 0.2 ~ 0.3 m/s であることを報告した。

これらの研究では「にじみ出し現象」の発生頻度や、発生時の気象的な特徴は明らかにされており、「にじみ出し現象」とそれに伴う冷気の影響の及ぶ範囲などが示されたが、都市緑地によって生成された冷気が、どのように生成されたエリアから市街地へ向かっているのかについては明らかになっていない。

そこで本研究では、「にじみ出し現象」の発生と、都市緑地内での冷気の動きを同時に測定し、把握した。そして、両者の結果を元に、推定された冷気移動と「にじみ出し現象」の関係について考察した。以下に結果を報告する。

2. 測定および解析方法

2.1 測定日時・場所

測定は、2002 年 7 月 22 日 ~ 28 日に、新宿御苑で行った。新宿御苑は Honjo *et al.* (2000), Narita *et al.* (2004) によって微気象観測がおこなわれ、クールアイランドであることと周辺市街地への冷気の移動の状況が明らかにされている。Fig. 1 に航空写真を示す。新宿御苑は面積 58.3ha で東京都内有数の大規模緑地である。御苑内の大部分は草地、樹林地で占められており、一部に水面、建物がある。Fig. 1 において水面は黒に着色した。

解析に使用したデータは、2002 年 7 月 23 日、26 日、27 日の夜間のもので、この間は、静穏な夜間であった。

2.2 測器の位置

冷気の移動を把握するための温度センサは、Fig. 2 に示す模式図のように、熱電対を地上 90 cm の高さに取り付け、20 m 毎に 200 m にわたり配置した。以下、これらのセンサを熱電対アレイと呼ぶ。またこの図に従い、熱

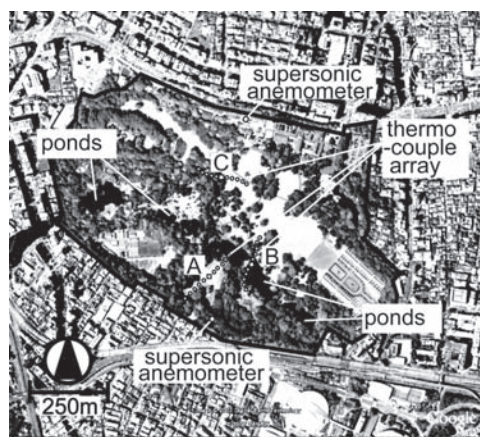


Fig. 1. Location of thermocouple arrays and super-sonic anemometer in Shinjuku Gyoen Park.

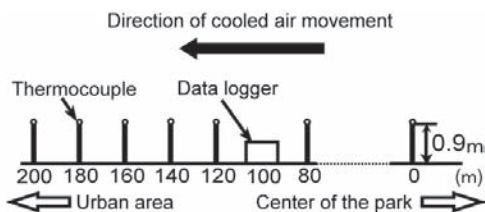


Fig. 2. Description of thermocouple array used in this study.

電対アレイの御苑中央芝地側の端を 0 m 地点とし、芝地側の端からの距離で各地点を表す。この熱電対アレイを Fig. 1 に示す。A 千駄ヶ谷門付近、B 池の上部、C 樹林と芝生の境界の 3 箇所、に設置し、測定を行った。測定間隔は 2 秒毎で測定精度は 0.1 °C である。また、Fig. 1 に示す御苑北側と御苑南側の 2 地点において高さ 1.4 m に超音波風速計を設置した。風速の南北、東西、上下の三成分それぞれを、1 分毎に記録した。すべてのデータは、データロガーに記録した。

また、Fig. 3 に新宿御苑の等高線図と熱電対アレイの設置状況の模式図を示す。模式図において地面を表す実線は芝生、点線は水面である。

2.3 冷気移動速度の推定方法

緑地で生成された冷気が市街地方向へ移動するのに伴い、温度は緑地側から市街地側の順に一時的に低下するはずである。そこで、熱電対アレイの隣り合う 2 つのセンサで一時的な温度低下が測定されたときの、温度低下が発生する時間差と両温度センサの距離から冷気の移動速度を推定した。冷気が移動した場合における二地点の温度低下の時間差の例を Fig. 4 に示す。Fig. 4 で実線と点線が L m 離れているとき、冷気の移動速度は $L/\Delta t$ (m/s)

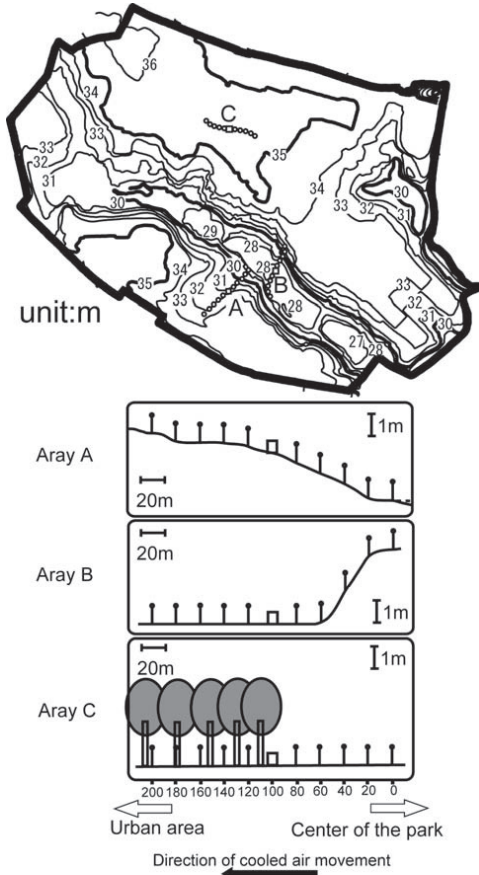


Fig. 3. Contour map of Shinjuku Gyoen Park.

- temperature at the point near the center of the park
- temperature at the point near the urban area

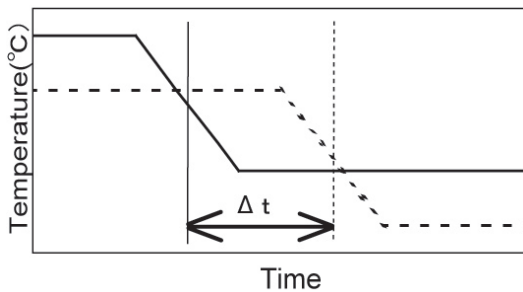


Fig. 4. Time lag (Δt) of temperature decrease between two measuring points in the case of movement of cooled air.

で求められる。

2.4 温度低下箇所の抽出方法

2.3で説明した温度低下の箇所を測定データから自動的に抽出する方法として、本研究では相互相関係数を

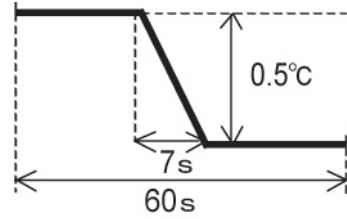


Fig. 5. Pattern used for the calculation of cross correlation.

いた。相互相関係数は異なる二つの時系列 $x(t)$, $y(t)$ 間の相関を定量的に表わすものであり、以下によって定義される (Hino, 1977)。

$$R_{xy}(\Delta t) = \frac{\overline{x(t)y(t+\Delta t)}}{\sqrt{\overline{x(t)^2}} \sqrt{\overline{y(t+\Delta t)^2}}}$$

Δt : time lag, $\overline{x(t)y(t+\Delta t)}$: $x(t)$ と $y(t)$ の共分散, t : 時間 (s),

$$\sqrt{\overline{x(t)^2}} \sqrt{\overline{y(t+\Delta t)^2}}: x(t), y(t+\Delta t) \text{ の分散}$$

測定データを観察した結果、冷気が移動していると考えられる場合には、1箇所のセンサについて、概ね 0.5°C 程度の温度低下が1分以内に起こる現象が測定結果全般に見られた。中でも、最も顕著に温度低下が連続していた箇所をモデルとして Fig. 5 に示すような、1分間に7秒間で 0.5°C 温度が低下するパターンを用意し、そのパターンとの相互相関係数が高いことを条件として、温度低下の箇所を抽出した。この場合の、相互相関係数の値は、 0.75 以上とした。この値は、相互相関係数の基準値を $0.70, 0.80, 0.85, 0.75, 0.76, 0.74$ の順に変化させて結果を検証し、過不足なく必要な箇所を抽出できることから決定した。

2.5 温度低下箇所の組み合わせ方法

冷気移動を推定するために、抽出した温度低下の箇所同士を組み合わせる際、次のような条件を設けた。第一に、冷気移動速度が風速と大きく異なることはないと考え、測定期間の風速の結果から、算出した冷気移動速度が、 0.1 m/s 以上 2.0 m/s 以下のもののみ選択した。第二に2点間の温度低下の組み合わせは極めて多数のものがあ、それらすべてにおいて、冷気移動があったとは考えられないため、抽出された箇所が、それぞれ連続した3地点以上で測定されたデータから抽出された場合のみ組み合わせた。たとえば、 120 m 地点と 140 m 地点間を 0.1 m/s 以上 2.0 m/s 以下の速度で冷気が移動していると推定される2箇所が抽出されたとしても、その移動が 160 m 地点まで達していない場合は除外した。第三に、第一、第二の条件を満たす場合が複数存在するときは、抽出され

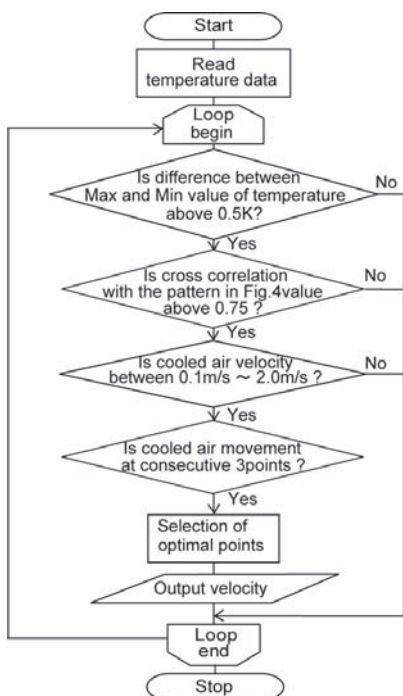


Fig. 6. Flow chart of the analysis.

た3箇所の中で隣り合う箇所同士の相互相関係数を算出し、その平均が最も大きい場合を選択した。これらの手順をまとめたものを Fig. 6 に示す。

2.6 「にじみ出し現象」の抽出方法

「にじみ出し現象」の発生時には、緑地の周囲全方向へ冷気が流出することから風向はすべての方位で緑地から市街地へ向かう。そこで本研究では、苑内北側に設置した超音波風速計で南風（南から北へ吹く風）と、苑内南側に設置した超音波風速計で北風（北から南へ吹く風）とが同時に観測されたときを、「にじみ出し現象」の発生時と定義した。

3. 結果と考察

3.1 冷気移動

解析により、抽出され、組み合わせられた箇所を含む典型的な測定データを Fig. 7 に示す。抽出した箇所である、 Δt 、 $\Delta t'$ の間隔において Fig. 5 に示したモデルパターンと異類似した温度変化が各地点のグラフで見られる箇所を丸印で示した。40 m, 60 m, 80 m 地点間を冷気が移動したため、このように連続して温度が低下したと考えた。このときの冷気移動速度は $40 \text{ m}/(\Delta t + \Delta t')$ で計算されおよそ 0.16 m/s である。

全部で 95 箇所の冷気移動が抽出され、23 日は 13 箇所、26 日は 39 箇所、27 日は 43 箇所であった。Fig. 8 の (a) ~ (c) に、推定した冷気移動の、熱電対アレイ A と B に

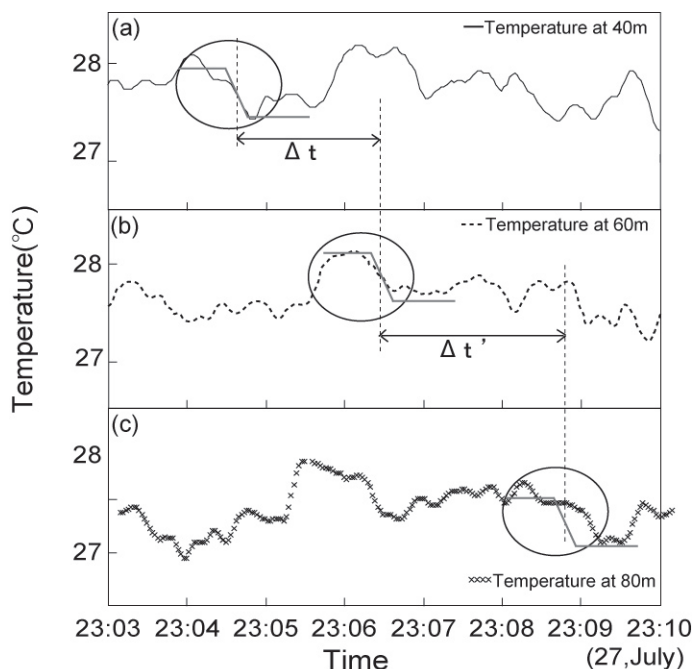


Fig. 7. Typical measured pattern of movement of cooled air in array A.

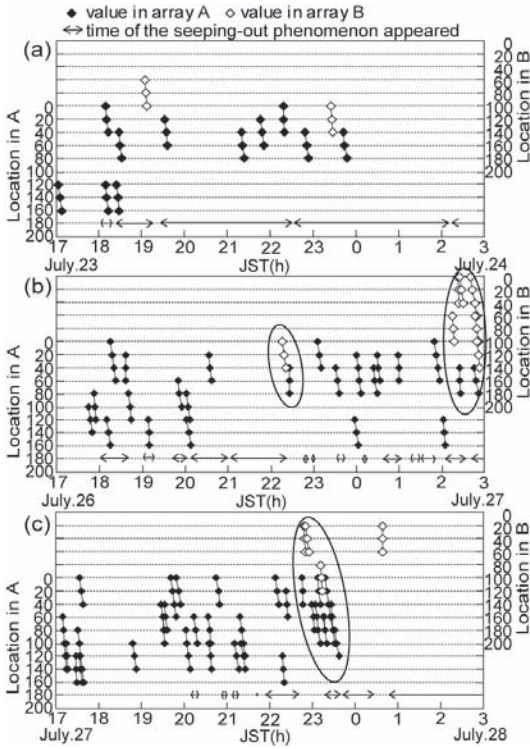


Fig. 8. Observed movement of cooled air in array A, B.

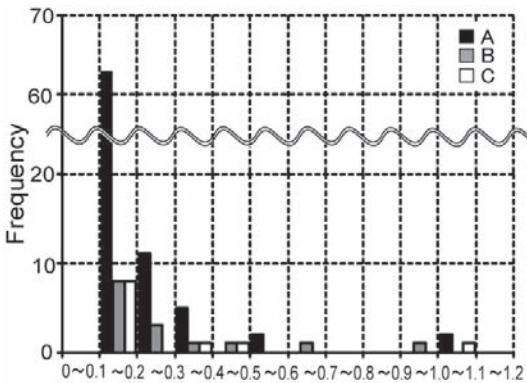


Fig. 9. Distribution of wind velocity of cooled air movement in array A, B and C (17:00 27th July to 5:00 28th July 2002).

おける地点と時刻の分布を示す。Fig. 7で例を挙げた3地点のように組み合わせた地点同士を、線で結んで表示した。(a), (b), (c)はそれぞれ7/23から7/24, 7/26から7/27, 7/27から7/28の夜間の結果である。縦軸はFig. 1に表した熱電対アレイにおける地点を示す。Fig. 2に示すように熱電対アレイAは熱電対アレイBよりも

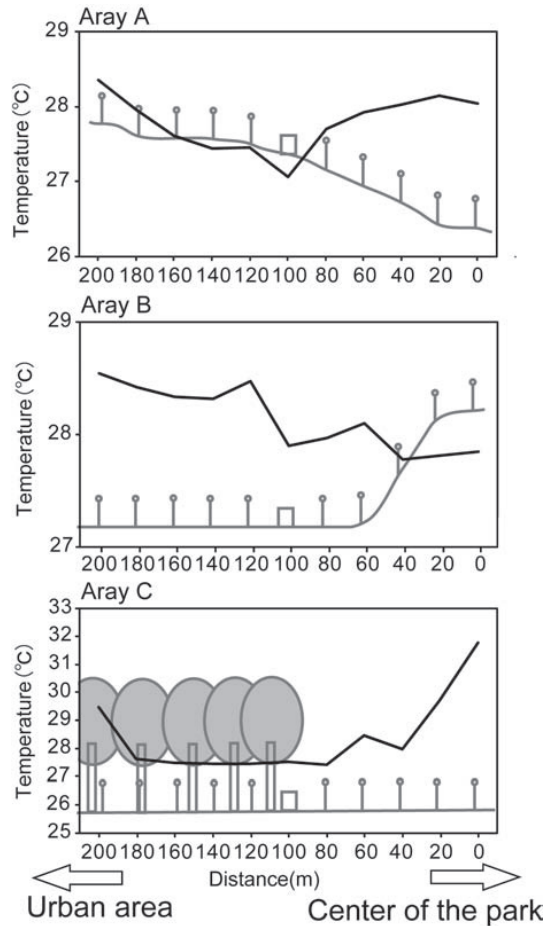


Fig. 10. Air temperature of Array A, B and C at 23:30 27th July 2002.

100 m 南よりであるため、グラフでも熱電対アレイAにおける地点を左に、熱電対アレイBにおける地点を右に表示し、それらを100 m ずらして表示した。(b)と(c)に表示した結果では、丸で示した箇所のように、熱電対アレイBを移動する冷気がそのまま熱電対アレイAも通過していると推定される箇所がいくつか存在する。特に、(c)の23時から翌0時の間には、熱電対アレイBにおける20 m 地点から、熱電対アレイAにおける120 m 地点までの200 m を冷気が移動していると推定される。これら(b)と(c)で丸印をつけた、推定冷氣移動が多数抽出される23時から翌3時の時間帯は、Nagatani *et al.* (2007)において「にじみ出し現象」の発生頻度が高い時間帯と一致しており、冷氣移動と「にじみ出し現象」は発生時間については類似があると言える。

全体的な傾向としては、3日間とも熱電対アレイAにおける0 m 地点～100 m 地点(熱電対アレイBにおい

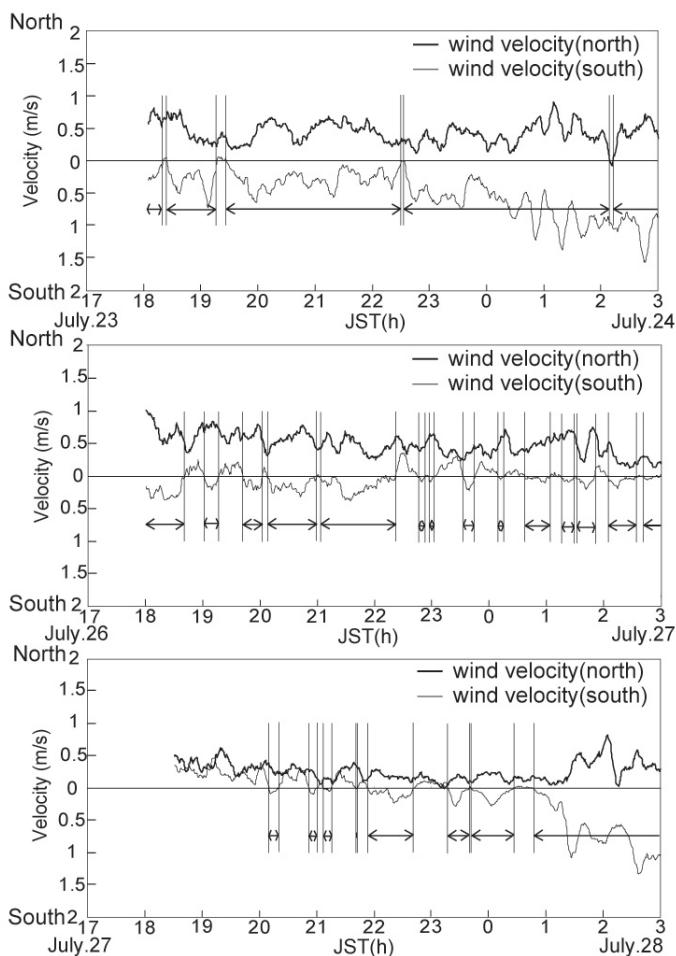


Fig. 11. Strength of park breeze calculated from measurement by supersonic anemometer.

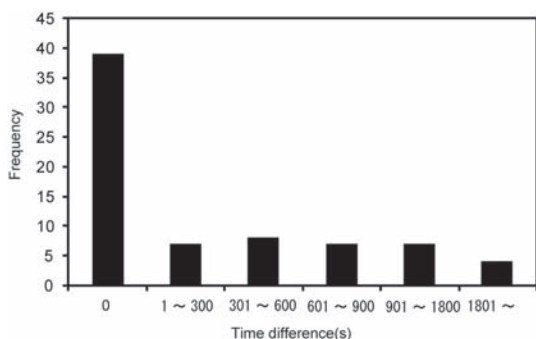


Fig. 12. Time difference between cooled air movement with park breeze.

ては 100 m 地点～200 m 地点) に比較的集中して、冷気移動が推定される箇所が見られた。

一方、熱電対アレイ B の 0 m ～ 80 m 地点においても、

比較的冷気移動が多く見られた。これは Fig. 3 で示したように、熱電対アレイ B の 0 m ～ 80 m が急な斜面になっていることが原因と考えられる。Narita *et al.* (2004) でも斜面で冷気移動が起こりやすいことが示唆されている。

次に Fig. 8 の結果を元に、Fig. 9 に、27 日 17 時～28 日 5 時の夜間における各地点の推定冷気移動速度の発生頻度分布を示す。各箇所とも 0.2 m/s 未満の移動が大半であり、熱電対アレイ A での頻度が非常に高いことがわかる。上限を 2.0 m/s として抽出したが、1.1 m/s 以下の冷気移動しか抽出されなかった。熱電対アレイ B, C は地理条件に差があるにも関わらず移動速度の傾向はあまり差がみられない。これは他の 2 日間においても同様の傾向が見られた。

冷気移動が盛んに見られた 2002 年 7 月 27 日 23:00 ～ 24:00 の熱電対アレイの気温分布 (平均値) は Fig. 10 のようであった。熱電対アレイ毎に異なるパターンが

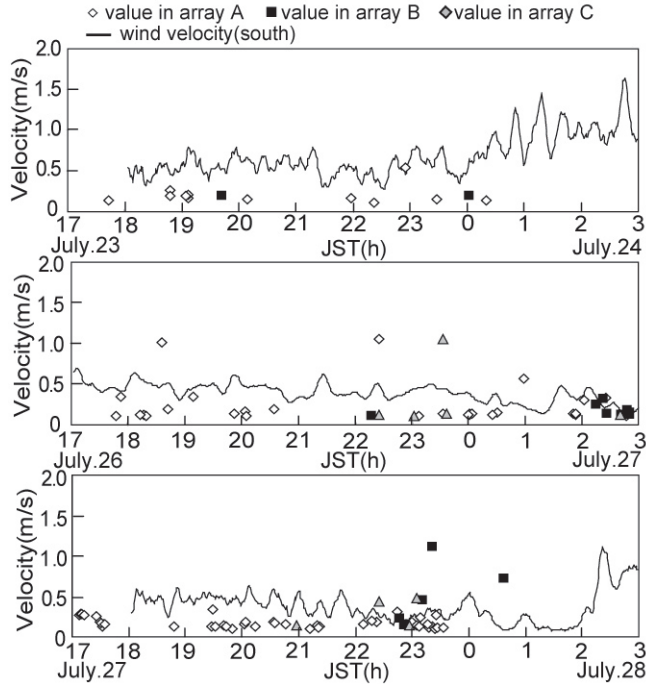


Fig. 13. Relations of cooled air velocity and wind velocity measured by supersonic anemometer at south point.

見られ、アレイ A では中心部の気温が最も低く、アレイ B においては芝生側が最も低温となり、市街地側へ近づくにつれて気温が高くなっている。また、アレイ C においては樹林内部が最も低温で芝生はそれに比べ気温が高かった。

3.2 「にじみ出し現象」発生時間帯

Fig. 11 に南北の超音波風速計で測定された風速の南北成分の時間変化を 10 分平均で平滑化したものを示す。グラフの中心より上部は南から北へ向かう風速、下部は北から南へ向かう風速を表わしている。矢印は「にじみ出し現象」の発生時間帯を示している。すなわち、北側の超音波風速計で測定された風向が、南から北へ向かい、かつ、南側の超音波風速計で測定された風向が北から南へ向かっている時間帯である。

3.3 推定された冷気移動と「にじみ出し現象」との比較

Fig. 12 に、風速を測定していた時間帯 18:30 以降の、熱電対アレイ A の 72 箇所について、推定された冷気移動が速度を保ったまま市街地側へ移動した場合の御苑外縁部への到達予測時刻と、Fig. 11 に示した「にじみ出し現象」の発生時刻との関係を示す。冷気の移動によって「にじみ出し現象」が発生することから、冷気移動の後に「にじみ出し現象」が観測されると考えられる。Fig. 12 に示したように、72 箇所中 39 箇所、約 54% は冷気の到達予測時刻と「にじみ出し現象」とは一致している。

3.4 風速との比較

Fig. 13 に南側の超音波風速計によって測定された風速の 10 分平均のグラフと冷気移動の比較を示す。3 日間を通して、風速の小さい時間帯に地点を問わず冷気移動が多く発生している。風速が大きくなると冷気移動は見られない。超音波風速計により測定された風速の値が 0.5 m/s 以下の場合であっても、冷気移動速度は、それより小さい値をとる場合がほとんどであった。

4. まとめ

夜間のスケールの大きな都市緑地内における冷気移動の様子を把握するため、新宿御苑において熱電対を 200 m に渡って並べ、温度計測を行い、そのデータを相互相関係数を用いて解析した。

その結果、冷気移動の速度分布と時間・空間分布が得られ、本研究で用いた相互相関係数を使用した解析方法によって、熱電対アレイによる測定から、冷気移動の様子が推定できた。「にじみ出し現象」の発生と冷気の移動から予測される御苑外縁部到達時刻との間には 72 箇所中 39 箇所の一致することがわかり、冷気移動と「にじみ出し現象」にはある程度関係がみられた。

今後の課題としては、平坦かつ地表面が単純な緑地での観測による冷気移動と「にじみ出し現象」発生の関係や、シミュレーションによる冷気移動のメカニズムの解明など

がある。

引用文献

- Eliasson, I. and Upmanis, H., 2000: Nocturnal Airflow from Urban Parks-Implications for City Ventilation, *Theor. Appl. Climatol.* **66**: 95–107
- Honjo, T., Sugawara, H., Mikami, T., Narita, K. and Kuwata, N., 2000: Actual survey of a cool island effect of Shinjuku-Gyoen. *Pap. Environ. Inf. Sci.*, **No. 14**, 273–278 (本條 毅・菅原広史・三上岳彦・成田健一・桑田直也, 2000: 新宿御苑のクールアイランド効果の実測. 第14回環境情報科学論文集, 273–278).
- Maruta, Y. 1972: The Various Studies on Urban Climatology have Demonstrated the Following Findings, *City Planning*, 69・70, 49–77. (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).
- Nagatani, Y. Umeki, K., Honjo, T., Sugawara, H., Narita, K. and Mikami, T., 2000: Analysis of Park breeze in Shinjuku-Gyoen from long-term observation. *Pap. Environ. Inf. Sci.*, **No. 21**, 507–512 (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. 第21回環境情報科学論文集, 507–512).
- Narita, K., Mikami, T., Sugawara, H., Honjo, T., Kimura, K. and Kuwata, N., 2004: Of a cool island and chill in Shinjuku-Gyoen begin to be blurred, and is a phenomenon. *Geogr. Rev. Jpn.*, **77–6**, 403–420. (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. 地理学詳論, **77–6**, 403–420).
- Thorsson, S and Eliasson, I, 2003: An intra-urban thermal breeze in Goteborg, Sweden. *Theor. Appl. Climatol.* **75**: 93–104