

都市内の小規模緑地が周辺市街地の気温に及ぼす影響

Influence of small green park to surrounding building area

竹林 英樹*¹ 八木 里英子*¹
Hideki Takebayashi Rieko Yagi

*¹ 神戸大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Kobe University

Corresponding author: Hideki TAKEBAYASHI, thideki@koube-u.ac.jp

ABSTRACT

To the question that how long are air temperature reduction effects in the surrounding urban area affected by a small green park, horizontal air temperature profile in the leeward area of small green park are examined based on measurements results carried out in Kobe city and the numerical model to represent the advection and diffusion effects. Measurements results conducted in Tokyo and Osaka are also compared with the calculation results. It is considered that air temperature is dominated in accordance with the heat budget conditions in the urban area in more than about 50m from the green park.

キーワード：緑地，市街地，気温，測定，計算

Key Words : Green park, Building area, Air temperature, Field observation, Calculation

1. はじめに

都市内の小規模緑地による周辺市街地の（主に日中の）気温低下効果がどの程度の範囲にまで及ぶかは、公園緑地の整備を担当する行政関係者よりよく聞かれる質問の1つである。Moriyama ら⁽¹⁾は、上空 50m の流入風速 2~6m/s、地表面温度差 1~5°C、粗度 0.1~1.0m（緑地）、0.5~1.0m（市街地）の条件での数値シミュレーションを実施し、緑地に隣接する市街地における気温上昇及び市街地に隣接する緑地における気温低下を検討し、共に 150m 程度の距離まで影響が及ぶと考察した。評価高さは地上 3.25m である。Honjo ら⁽²⁾は、上空 200m の流入風速 4m/s、地表面温度差 4°C、粗度 0.2m（緑地、市街地）の条件での数値シミュレーションを実施し、緑地に隣接する市街地における気温上昇を検討し、100m の規模の緑地であっても 300m 程度の距離まで影響が及ぶと考察した。評価高さは地上 2m である。岡田ら⁽³⁾は実測結果と簡易拡散モデルの結果を比較し、地表面との熱交換や障害物の影響などを考慮する必要があると指摘した。

著者ら⁽⁴⁾は、神戸市内の 4 箇所の市街地で測定を行い、上下（4.0m と 1.5m）の温度勾配のばらつきが大きく、市街地内の測定点周辺状況に応じて気温低下効果が異なる様子が考察された。日本の多くの都市では夏期日中に海風が卓越するため、小規模緑地の風下側市街地において移流効果による気温低下が期待されるが、拡散効果で冷気はすぐ

に混合されると想定される。本研究では測定結果を整理し、移流、拡散を表現する数値モデルにより小規模緑地風下側市街地における気温形成を考察した。

2. 測定の概要と結果⁽⁴⁾

2.1 測定の概要

神戸市内の六甲山南側の市街地に位置する緑地 3 箇所と周辺市街地を対象として、2012 年 8 月 2 日（東遊園地(約 2.7ha、緑被率約 45%)と業務地域)、4 日（石屋川公園(約 4ha、緑被率約 42%)と住宅地域)、8 日（大倉山公園(約 7.9ha、緑被率約 70%)と住宅地域）の 13 時と 17 時に移動測定を行った（図 1）。東遊園地と業務地域は、神戸市の中心部に位置し、業務地域内には神戸市役所などの公共建物と一般のオフィスなどが存在する（中高層建物の比率が大きい）。石屋川公園と住宅地域は、神戸市の東側の六甲山南麓の市街地内に位置し、住宅地域内には主に戸建住宅と小規模な集合住宅が存在する（低層建物の比率が大きい）。大倉山公園と住宅地域は、神戸市の西側の六甲山南麓の市街地内に位置し、住宅地域内には戸建住宅、集合住宅とともに病院なども存在する（低層建物と中層建物が混在する）。測定項目は、1.5m 高さの気温、風向、風速、表面温度である（表 1）。風速は移動測定点において 1 秒毎のサンプリングを 30 回実施し、30 秒間の平均値を記録した。風向はこの 30 秒間の最多頻度を記録した。定点での気温の測定結果を図 2

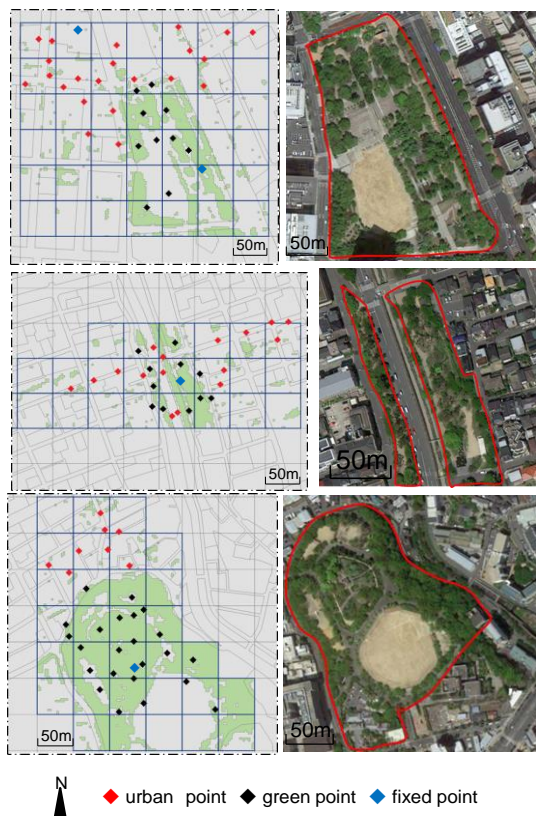


図1 移動測定点と航空写真（上：東遊園地と業務地域，中：石屋川公園と住宅地域，下：大倉山公園と住宅地域）
（グリッドは50m毎，緑色は緑被を示す）

に示す。温度計（サーミスタ）は、神戸市役所3号館の屋上（地上47m）と東遊園地、石屋川公園、大倉山公園内の樹幹（地上3m）に自然通風式の日射遮蔽装置内に入れて設置した。神戸市役所と東遊園地は近接しているが、石屋川公園、大倉山公園とは距離があるため、単純な比較はできない。移動測定には最大1.5時間を要したが、定点測定の結果より急激な気象の変化は確認されなかったため、補正は行っていない。なお、次節の解析には市街地内での移動測定の気温と当該時刻の公園内での定点測定の気温との差を用いる。

2.2 測定の結果

緑地と市街地の境界を0とし、その地点からの水平距離と気温変化の関係に注目して分析を行う。東遊園地周辺での測定の場合には主風向が南西であったため、北東側市街地の測定結果を用いた。各移動測定点から南西方向に直線を引いて公園までの距離を算出した。同様に、石屋川公園周辺での測定の場合には主風向が東であったため、西側市街地の測定結果を用いた。大倉山公園周辺での測定の場合には主風向が南南東であったため、北側市街地の測定結果を用いた。市街地における緑地からの距離と気温上昇量（風上側緑地の平均気温との差）を図3に示す。弱風時に気温上昇量が大きく、緑地からの距離が30m程度以上で市街地内の気温になっていると読み取れる。弱風時の市街地内の

表1 測定機器と測定方法

	Device	Method
Air temperature	Thermistor with solar radiation shield	Averaged for 5 minutes by sampling every 5 seconds
Wind direction	Windsock	Most frequency in 30 minutes
Wind velocity	Hot-wire anemometer	Averaged for 30 minutes by sampling every second
Surface temperature	Infrared thermometer	Measured on ground and wall surface

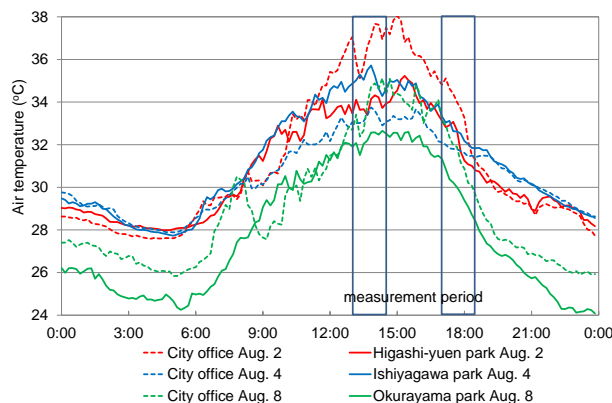


図2 定点での気温の測定結果（2012年8月2, 4, 8日）

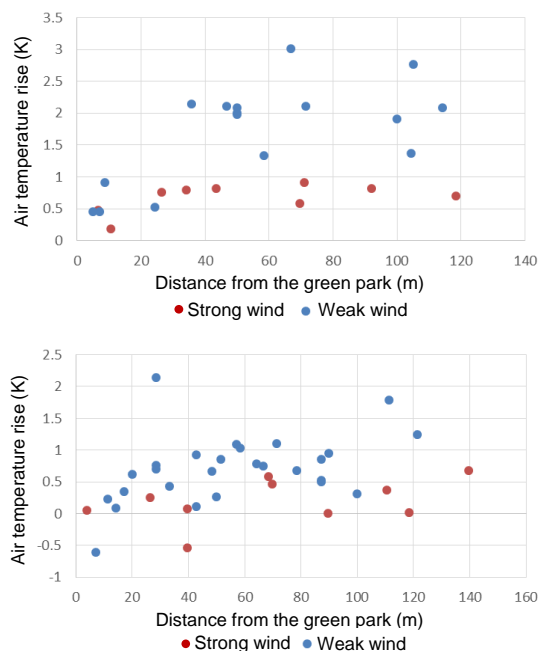


図3 緑地からの距離と気温上昇量（上：13時，下：17時）

気温は、局所的な風通しや日射遮蔽の影響で変動していると考察される。なお、強風と弱風は神戸地方気象台の風速5.5m/sで区分した。強風時の風速は、市街地内の地上1.5m高さで1.0~1.3m/s（13時）と0.7~1.1m/s（17時）、弱風時は0.5~1.0m/s（13時）と0.4~1.1m/s（17時）であった。市街地内の風速は周辺建物等の影響でばらついていて、

3. 計算の概要と結果

3.1 計算の概要

CFD により計算を行った。乱流モデルには標準 k-εモデルを用いた。計算モデルの概要を表2に示す。都市空間への適用に際してヴァンカラ⁽⁵⁾は浮力効果を鉛直方向の渦粘性モデル係数 C_μ と乱流プラントル数 P_n に集約し、フラックスリチャードソン数 R_f の関数として渦粘性係数 ν_t を表現するモデルを提案した(式(8)~式(11))。本研究では、この式(7)と従来の式(6)の両方を用いて検討を行った。式(7)右側の鉛直方向の渦粘性係数 ν_t の算出に際して式(8)~式(11)が用いられる。計算条件及び概要を表3、図4に示す。モデルの構成はMoriyamaら⁽⁴⁾に従って設定し、計算条件は測定時の気象条件に基づいて設定した。測定点を50mグリッドに最低1点ずつ選定したことに対応して、水平方向のメッシュサイズを50mに設定した。緑地から市街地へ流出する現象を3次元で表現している。流入条件の緑地内の気温鉛直分布は一律に与えた。海風の卓越する条件で測定したため、上空風速は比較的大きい。

表2 計算モデルの概要

Standard k-ε model	
$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$	(1)
$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{\pi}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu_t + \nu \right) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} + \frac{g_i}{\Theta_0} (\Theta - \Theta_0) - 2\epsilon_{i,j,k} \Omega_j \bar{u}_k$	(2)
$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_1} + \nu \right) \left(\frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right\} + \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \epsilon - g\beta \frac{\nu_t}{P_n} \frac{\partial \Theta}{\partial x_k}$	(3)
$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_2} + \nu \right) \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) \right\} + C_1 \frac{\epsilon}{k} \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_2 \frac{k\epsilon}{\nu_t}$	(4)
$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\theta} \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{\nu_t}{P_n} + \nu \right) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} \right\} + \frac{\bar{Q}}{C_p \rho}$	(5)
Determination method of eddy viscosity coefficient ν_t	
Conventional Isotropic diffusion model	
$\nu_t = C_D \frac{k^2}{\epsilon}$ (horizontal and vertical diffusion)	(6)
Model incorporating buoyancy effect	
$\nu_t = C_D \frac{k^2}{\epsilon}$ (horizontal diffusion) $\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ (vertical diffusion)	(7)
C_D : Eddy viscosity constant (0.09) C_μ : Eddy viscosity coefficient	
$C_\mu = \frac{0.8\phi\gamma - 0.5\gamma(\phi_0 - \gamma)}{0.8\gamma + \phi(\phi_0 - \gamma)} \frac{0.53 - 0.94R_f}{1 - R_f}$	(8)
$P_n = P_{n0} \frac{1.59 - R_f(1.5\phi_0 + 2.82)}{1.59 + R_f(3\phi - 5.22)}$	(9)
$\gamma = \phi_0 \frac{1.59 - 5.22R_f}{1.59 - 2.82R_f} \quad \phi = 0.2 \quad \phi_0 = 1/3.2$	(10)
$R_s = \frac{\beta g}{\left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right]} \quad R_s \leq 0.195 \quad R_f = 0.6588 \left[R_s + 0.1776 - (R_s^2 - 0.3221R_s + 0.03156)^{1/2} \right] \quad R_s \geq 0.195 \quad R_f = 0.191$	(11)

表3 計算条件

	13:00	17:00
Inflow air temperature with uniform vertical profile	33°C	31°C
Inflow wind velocity at 50m high with logarithmic vertical profile	Large: 5.6m/s Small: 4.1m/s	Large: 4.7m/s Small: 4.2m/s
Sensible heat from ground surface	314W/m ²	196W/m ²
Roughness parameter	0.5m	
Horizontal mesh size	50m	
Vertical mesh size	3m	

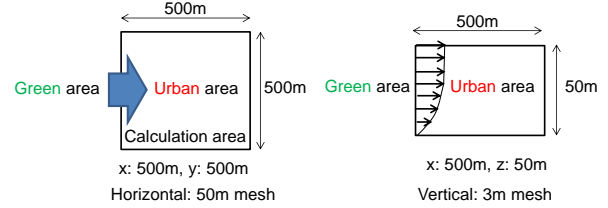


図4 計算条件の概要

3.2 計算の結果

計算結果と測定結果の比較を図5、6に示す。水平、鉛直方向の両方の渦粘性係数 ν_t を式(6)で与えた等方拡散モデルの場合と、鉛直方向の渦粘性係数 ν_t を式(7)の右式で与えた浮力効果考慮モデルの場合の計算結果を示す。計算結果の地表近傍計算格子の熱流成分を図7に示す。浮力効果考慮モデルの場合には、鉛直方向の拡散効果により地表面で供給された顕熱が鉛直方向に輸送されるため、地表付近は高温になりにくい。緑地から50m以上市街地内に入ると移流効果より鉛直方向の拡散効果に支配される。

流入風速が大きい場合に、浮力効果考慮モデルの場合の計算結果が気温の測定結果と一致する傾向にあるが、流入風速が小さい場合には鉛直方向の拡散効果が卓越しない等方拡散モデルの計算結果が測定結果と近くなる。従って、既往研究(等方拡散モデル)の計算結果は、流入風速の小さい場合に測定結果と整合しやすく、図5,6の下図の通り、緑地からの距離が150m以上であっても距離と共に気温は上昇し、その影響は200m以上まで及ぶと解釈することができる。しかし、流入風速が小さいため、鉛直拡散効果が小さく、市街地内の気温上昇は流入風速が大きい場合と比較して大きい。このとき、図5下図の測定結果に見られるように、市街地内の気温は局所的な風通しや日射遮蔽等の影響でばらつきが大きい。

神戸市内の測定結果とともに、東京の小石川後樂園周辺市街地で実施された加藤ら⁽⁶⁾及び大阪市内の幾つかの公園、緑地周辺市街地で実施された森山ら⁽⁷⁾の測定結果と合せて計算結果と比較する(図8、9)。東京や大阪で測定された結果においても、緑地から50m以上市街地内に入って気温の上昇する傾向を確認することは困難である。この状況は岡田ら⁽³⁾によるつくば市の梅園公園周辺市街地における測定結果とも符合する。

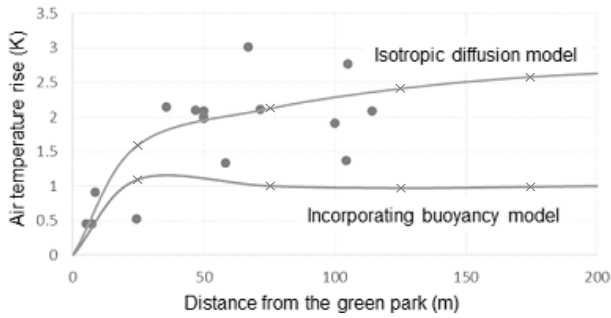
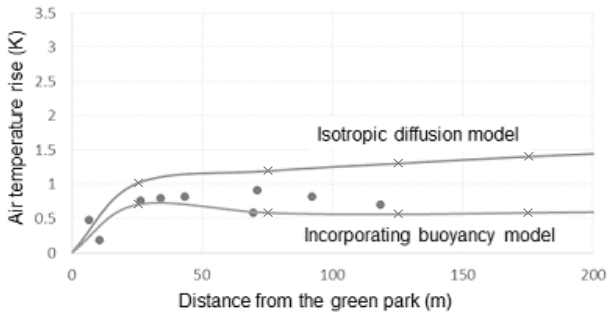


図5 13時の市街地における緑地からの距離と気温上昇量の計算結果と測定結果（上：風速大，下：風速小）

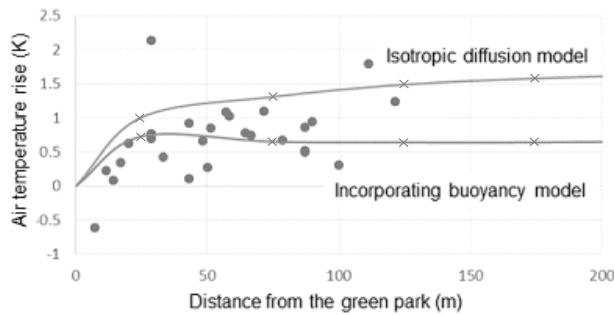
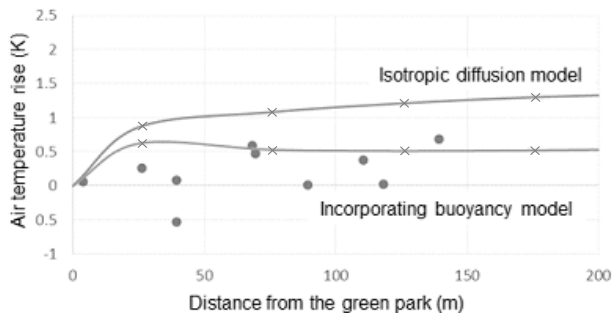


図6 17時の市街地における緑地からの距離と気温上昇量の計算結果と測定結果（上：風速大，下：風速小）

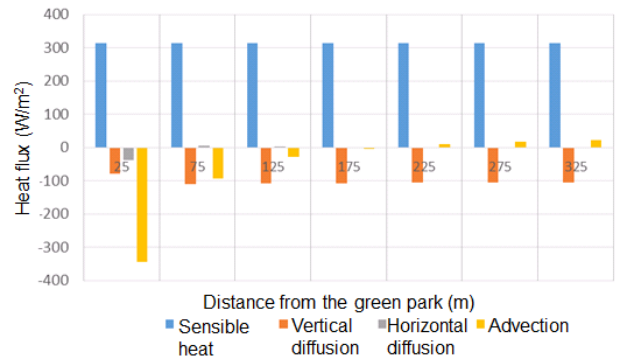
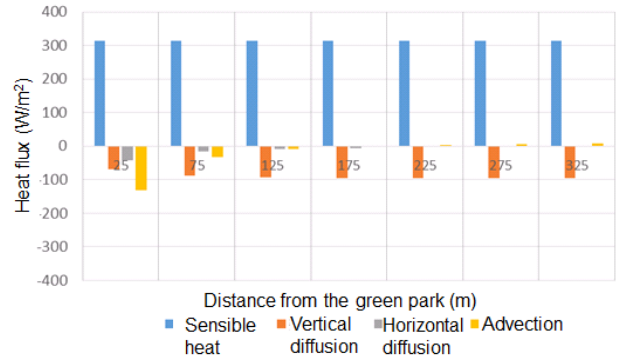


図7 市街地における緑地からの距離と熱流成分（13時，上：等方拡散モデル，下：浮力効果考慮モデル）

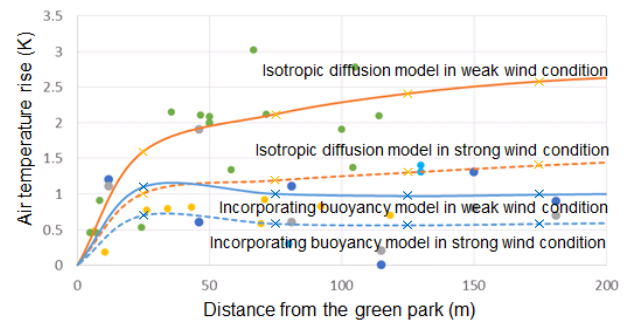


図8 市街地における緑地からの距離と気温上昇量の計算結果と様々な測定結果（日中）

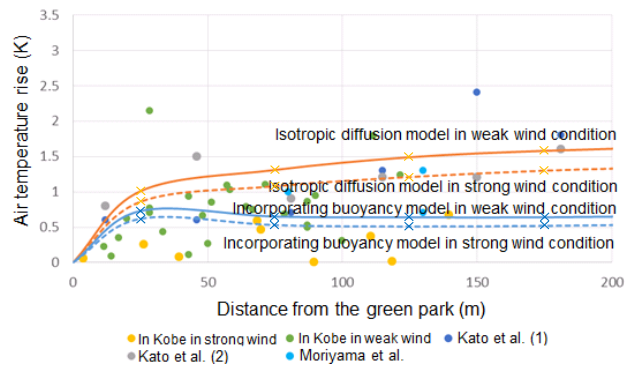


図9 市街地における緑地からの距離と気温上昇量の計算結果と様々な測定結果（夕方）

4. まとめ

夏期日中に都市内の小規模緑地による周辺市街地への気温低下効果がどの程度の範囲にまで及ぶかという設問に対し、神戸市内の小規模緑地の風下側市街地において実施した測定結果と移流、拡散を表現する数値モデルにより、小規模緑地風下側市街地における気温形成を考察した。測定時の気象条件に基づき、上空 50m の流入風速 4.1, 5.6m/s (13 時), 4.2, 4.7m/s (17 時)、市街地における地表面顕熱 314W/m² (13 時), 196W/m² (17 時)、粗度 0.5m (市街地) の条件での数値シミュレーションを実施し、緑地に隣接する市街地における気温上昇を検討した。なお、評価高さは地上 1.5m である。

浮力効果を考慮したモデルを用いた計算では、地表面から供給された顕熱が鉛直方向に輸送されるため、地表付近は高温になりやすく、緑地から 50m 以上市街地内に入ると、地表付近の気温は、移流効果より鉛直方向の拡散効果に支配される。流入風速が大きい条件及び夕方の方の神戸市内での測定結果、東京や大阪で測定された結果は、この計算結果と整合した。

流入風速が小さく、地表面から供給される顕熱が大きい条件での測定結果 (神戸市内で穏やかな海風が卓越した日中) は、既往研究 (等方拡散モデル) の計算結果と整合し、緑地の影響は 200m 以上まで及ぶと解釈された。しかし、流入風速が小さいため、鉛直拡散効果が小さく、市街地内の気温上昇は流入風速が大きい場合と比較して大きい。このとき、市街地内の気温は局所的な風通しや日射遮蔽等の影響でばらつきが大きく、顕熱発生量の抑制、熱交換特性の改善といった市街地内での熱環境改善方策が重要である。

なお、本研究では図 1 に示す通り小規模緑地内での気温の移動測定も実施しており、緑地内の気温分布の形成についても検討を行った。しかし、緑地内の気温は市街地より高温になる測定点も確認され、測定点周辺の緑被条件による日射の影響などが考察された。樹木、裸地、遊歩道などの被覆が混在する緑地の気温形成に対して、移流、拡散モデルによる検討は適さないと考察した。なお、定点測定地点は周辺を樹木で囲まれた樹冠の下に選定しており、樹木により構成された緑地内の温度が測定されていると判断した。

謝辞 測定に際して神戸市都市計画総局の皆様にご協力頂いた。計算には Moriyama ら⁽¹⁾が作成したソースコードを修正して利用した。記して謝意を示します。

参考文献

- (1) M. Moriyama, H. Takebayashi, K. Fukumoto, Effects of Green Areas on Urban Air Temperature by Numerical Solution, Mem. Grad. School Sci. & Technol. Kobe Univ., 15-A(1997), pp.101-115.
- (2) T. Honjo, T. Takakura, Simulation of thermal effects of urban green areas on their surrounding areas, Energy and Buildings, 15(1990-1991), pp.443-446.
- (3) 岡田牧・日下博幸・木村富士男, 夏季日中における小規模緑地が周囲街区の気温に与える影響, 日本ヒートアイランド学会第 6 回全国大会予稿集, (2011), pp.116-117.
- (4) 八木里英子・竹林英樹, 地表面温度と風速が地表付近の気温形成に与える影響に関する研究, 日本ヒートアイランド学会第 8 回全国大会予稿集, (2013), pp.48-49.
- (5) ヴタンカ・足永靖信, 空間平均処理を施した 3 次元都市キャノピーモデルの開発, 都市建築計画における都市気候予測システムの開発その 2, 日本建築学会環境系論文集, 586(2004), pp.45-51.
- (6) 加藤琢磨・山田正・日野幹雄, 都市内緑地とその周辺における気温と湿度の空間構造, 中央大学理工学研究所論文集, 12(2006), pp.63-71.
- (7) 森山正和・河野仁・吉田篤正・宮崎ひろ志・竹林英樹, 都市における樹木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(2001), pp.49-56.

(Received September 7, 2015, Accepted November 26, 2015)