

公園緑地からの冷気の流出とその熱的効果に関する CFD 解析

CFD Analysis of Heat Transport from Planted Area and Its Effects on Outdoor Thermal Environment

佐々木 澄 東北大学大学院, 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉06, E-mail: sasa@sabine.pln.archi.tohoku.ac.jp
持田 灯, 東北大学大学院, 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉06, E-mail: mochida@sabine.pln.archi.tohoku.ac.jp
吉野 博, 東北大学大学院, 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉06, E-mail: yoshino@sabine.pln.archi.tohoku.ac.jp
Kiyoshi Sasaki, Tohoku Univ, 06, Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai-City, Miyagi, 980-8579, Japan
Akashi Mochida, Tohoku Univ, 06, Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai-City, Miyagi, 980-8579, Japan
Hiroshi Yoshino, Tohoku Univ, 06, Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai-City, Miyagi, 980-8579, Japan

Velocity and temperature fields in and around planted park are analyzed by modified $k-\epsilon$ models, and predicted results are compared with measured data. Also, the difference of air temperature between the present conditions and the conditions without thermal effects of trees in the planted park are analyzed by numerical methods. Furthermore, advective and diffusive transports of cold air from planted park and their effects on outdoor thermal environment are examined based on the predicted results. It is shown that complicated airflow is generated by trees and buildings around boundaries between planted park and residential area. Such complicated air flow gives strong effects on transport of cold air from planted park to the surroundings.

1. はじめに

都市の夏季における暑熱環境の緩和、熱汚染の防除を図るといふ観点から、公園緑地や河川等のような都市内に存在する自然の冷温帯からの冷風を速やかに市街地に導入するという手法が注目を集め、多くの研究、提案がなされている。このような試みを成功させるためには、周辺の気流分布を理解し、大気の流れ・拡散メカニズムを適切に利用する必要がある。

筆者らは、既報^{文1),2)}において、仙台市の都心近傍に位置する大規模公園緑地とその周辺の市街地の暑熱環境に関する実測と、改良型の $k-\epsilon$ モデル^{文3)}による数値解析の結果を比較した。本報では、この数値解析の結果を用いて公園緑地からの冷気の流出過程とその熱的効果について検討した結果について示す。

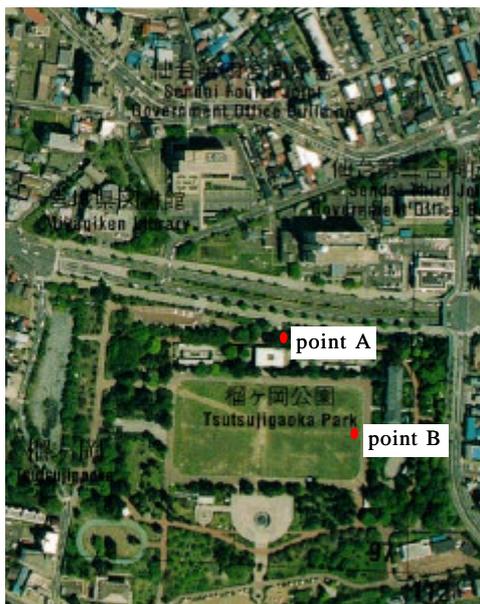


Fig.1 A birdview over the planted park and surroundings

2. 解析概要

2.1 解析対象

解析対象は、公園緑地と市街地を含む東西に約450m、南北に約600mの領域である(Fig.1, Fig.2)。この対象領域において、筆者らは2000年8月3日～4日の9:00～17:00の間に野外実測を行っている^{文1),2)}。解析は実測を行った8月4日13時付近の暑熱環境を対象とした。

2.2 解析条件

初期条件及び上空の境界条件は解析対象領域内にある仙台管区気象台のデータを基に与え、外気温28.2℃とした。地表及び樹木、建物の表面温度は赤外放射温度計を用いた測定結果を基に与えた^{注1)}。高さ52mの風速を4.8m/sとし、 z_0 を含む形式の対

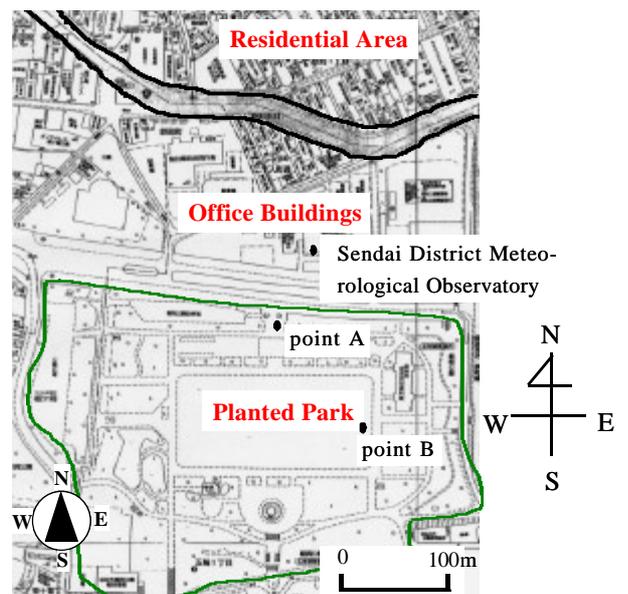
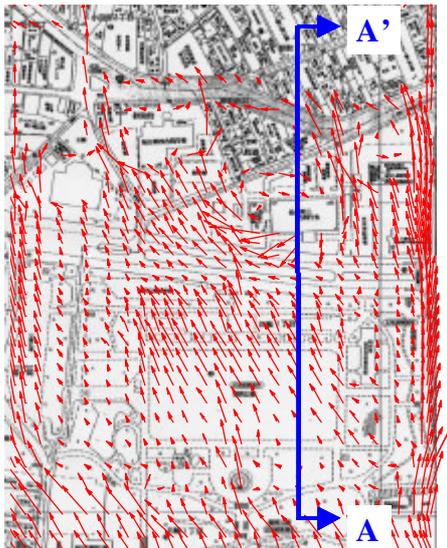
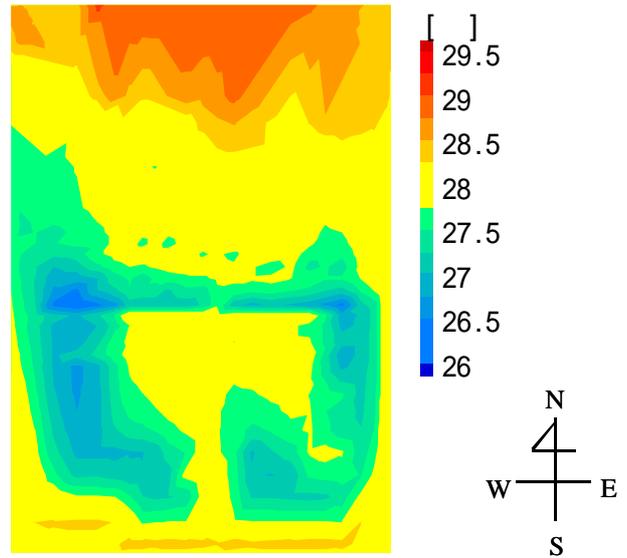


Fig.2 Computational domain

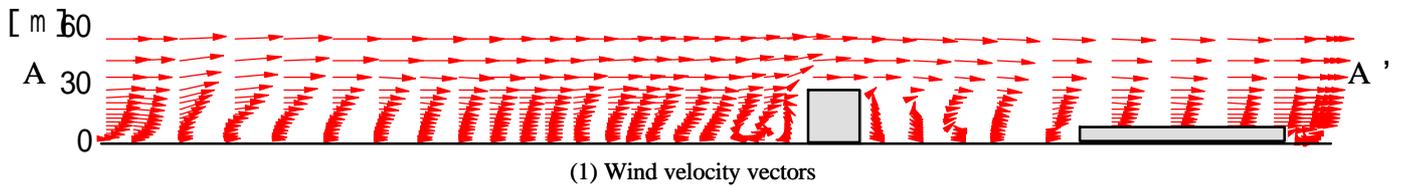


(1) Wind velocity vectors

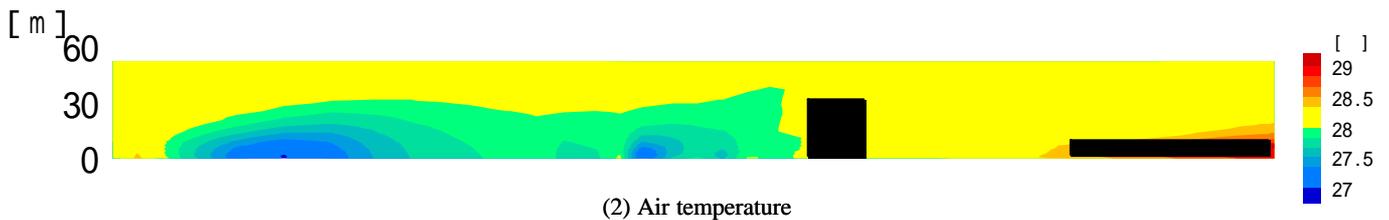


(2) Air temperature

Fig.3 Horizontal distribution of velocity vectors and air temperature (at a height of 1.5m)



(1) Wind velocity vectors



(2) Air temperature

Fig.4 Vertical distribution velocity vectors and air temperature at A-A' section

数則に従う風速鉛直分布（摩擦速度 $\langle u^* \rangle = 0.43\text{m/s}$ 、粗度長 $z_0=0.5\text{m}$ ）を与え、風向は南南東とした。他の計算条件をまとめて注2)に示す。解析はLaunder-Katoモデルの適用範囲に制約条件を課した改良型のk-モデル(Table.3中のRevised LK model)を使用し、乱流熱fluxの評価への浮力効果の組み込みはTable.4のモデルを用いた^{文3),4),注3)}。さらに樹木の流体力学的効果を再現するために文5),6)のモデルを付加している^{注4)}。樹木の葉面積密度は実測値を基に分布を与え^{注5)}、人工排熱として自動車からの排熱^{注6)}を考慮した。

3. 解析結果

高さ1.5mの風速ベクトル、温度の分布をFig.3に、公園北側の建物を通る南北断面(Fig.3(1)中のA-A'断面)の風速ベクトル、温度分布をFig.4に示す。Fig.3(1)、Fig.4(1)を見ると、樹木の密な部分や公園北側の建物の周辺で複雑な流れ場が形成されている。公園の北側では、密な樹木帯と建物影響により、公園北側出口付近でほぼ北側に、公園北側の道路上では西側に向かう流れが観察され、Fig.3(2)を見ると、緑地周辺の低温の空気が気流により風下に輸送されている様子が観察される。また、公園からの流出する冷気の流れが公園北側の高層建物風上面で

Table.1 Comparison of k between measurement and CFD prediction [m^2/s^2]

	Measurement (at 1.2m height)	CFD prediction (at 1.5m height)
Point A (on asphalt)	0.32	0.34
Point B (on grass)	0.66	0.62

(locations of points A and B : cf. Fig.2)

堰止められている様子が分かる(Fig.4(2))。

Table.1は乱流エネルギーkについて、数値解析結果と実測値を比較した結果である。ここではFig.2中のPoint A(公園中央芝生部分)とPoint B(公園出口)の数値を比較しているが、CFDの予測値と実測値は非常によく一致している^{文1),2)}。

4. 公園緑地の熱的効果の評価

数値解析結果から公園の暑熱環境緩和効果を評価するために、公園から公園外への流出する気流の持つ冷熱エネルギーの

評価を行う。また、公園内の樹木の有無による解析対象領域内の温度の変化を試算した結果を示す。

4.1 公園内外の発熱量の比較

数値解析の結果より、公園内外の発熱量を算出した。発熱量は、都市表面構成要素(地表、建物、樹木)の表面温度と空気温度の温度差に、対流熱伝達率^{注1)}を乗じて算出した。公園外ではさらに自動車からの排熱も考慮している。その結果、公園内では 25W/m^2 の吸熱、公園外では 228W/m^2 の発熱となった。なお、この発熱量は公園内外の単位面積あたりの発熱量の平均値であり、ここで述べる公園外とは解析領域内の公園北側の業務地区及び住宅地を指すものである。公園内では樹木や地表の表面温度が気温よりも低くなる面積が大きく、主として吸熱されている。一方、公園外では加熱された建物や地表からの顕熱fluxと自動車からの排熱により大きな発熱が生じている。

4.2 公園緑地の有無による温度分布の変化

公園緑地による冷却効果を検討するために、公園の熱的影響が無い状況を想定した数値解析を行い、その場合の温度上昇を試算した。ここで述べる公園が無い状況とは、広いオープンスペース、密集した樹木等の流体力学的効果はそのまま残し、冷熱源としての緑地の効果のみを無くしたものである。具体的には、現状(公園有)を対象とする解析の場合の公園外の市街地の単位面積当たりの平均発熱量(228W/m^2)を公園内の地表面の熱流境界条件として与えたものである。なお、このケースでは樹木の温度分布への影響はないものとした。すなわち、樹木の表面温度は周囲の空気温度と同一とし、樹木は気流にのみ影響

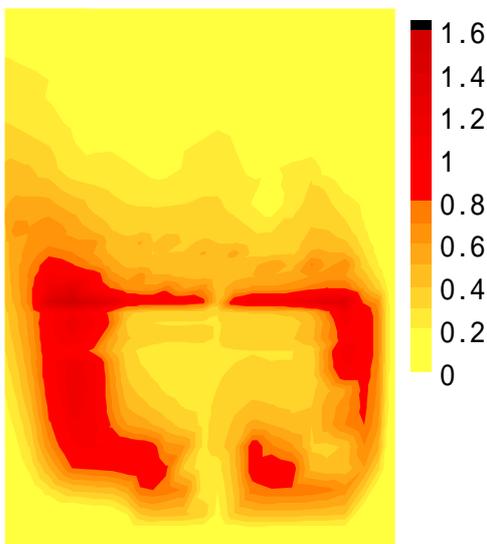


Fig.4 Increase of air temperature from the present condition with thermal effects by greens to no thermal effects with greens [°C]

Table.2 Heat transport by wind from planted park [kW]

+ : effect of increasing air temperature,
- : effect of decreasing air temperature

Case	Case1 (Present Condition)	Case2 (No Thermal Effects with Greens)
Integration from $x_3=0$ to 1.5m	-930	40
Integration from $x_3=0$ to 7.5m	-2743	94

を与えるものとした。Case2(公園無)とCase1(公園有)の地上1.5mにおける温度差(Case2 - Case1)をFig.5に示す。この数値は公園緑地によりどれだけ気温が低下しているかを示すものであるが、樹木の密な部分において温度差が大きくなり、樹木の気温低減効果が確認される。また、公園北側の分布を見ると、Fig.2(1)に見られるような地表面付近での南南東の風により、冷気が公園の北北西へと流れている様子が分かる。

4.3 公園から流出する冷熱エネルギーの算出

以下では、公園から市街地へ移流される冷熱エネルギーを試算した(Tabel.2)。ここでは、Case1(公園有)の境界面を通過する移流熱フラックスの値からCase2(公園無)の値を引いた値が公園緑地によりその北側の市街地へと供給される冷熱エネルギーであると考えた^{注7)}。公園と市街地の境界面から流出する冷熱エネルギーは、地表面から歩行者レベル(1.5m)の高さまでのトータルで約1.0MW、地表面から住宅高さレベル(7m)までを積分すると約2.8MWと試算される。すなわち、住宅高さレベルまでの高さで流出する冷熱エネルギーは、本解析範囲に存在する公園外における発熱量(約30MW)の10%弱にあたる結果となった。

5. まとめ

- 1) 今回の結果では、公園及び周辺市街地の地表付近の気温分布は、風速分布からほぼ説明できる。従って、形成される流れ場を予測できれば、冷気流の市街地への流出過程をある程度推定することができると言える。
- 2) 公園の熱的影響が無い状況を想定した数値解析を実施し、現在の状況(公園有)を対象とする解析結果と比較し、公園の暑熱環境緩和効果を試算した。公園緑地の冷却効果による気温低下は0.6 ~ 2.0 程度であった。
- 3) 数値解析の結果を用い、公園から市街地へと流出する冷熱エネルギーを試算した。今回の結果では、流出する冷熱エネルギーは約2.8MWと評価され、これは周辺市街地の地表付近からの発熱量の約10%に相当する。

[注]

注1) 地表面温度について、樹木帯内は25、芝生や空地(草地)は30、アスファルト面は45~50に設定し、対流熱伝達率は以下に示すコルゲスの式より与えた。

$$a_c = 5.3 + 3.6(V) \quad (V \leq 5\text{m/s})$$

$$a_c = 6.47(V)^{0.78} \quad (V > 5\text{m/s})$$

a_c : 対流熱伝達率[W/m²K], V : 地表面、固体壁面に隣接するグリッドのスカラ風速[m/s]

注2) 境界条件について以下に示す。

・流入面: 風速は上述した対数則で、 k 及び μ については以下に示す式より与えた。また、流入面の μ は28.2で一定、 μ は0とした。

$$k = C\mu^{-1/2} \langle u^* \rangle^2$$

$$e = \langle u^* \rangle^3 / k\alpha_3$$

ここで、 $C = 0.09$, $\langle u^* \rangle = 0.432$ [m/s], $\alpha_3 = 0.4$, x_3 : 鉛直高さ[m]

- ・流出面：諸量の法線方向の勾配を0とした。
- ・上空面： u_3 を0とし、その他の諸量については法線方向の勾配を0とした。
- ・地表面、建物表面：地表面、建物壁面とも generalized log law,
- ・スキーム：移流項には QUICK。

注3)解析に用いたモデルをTable3,4に示す。本解析では乱流エネルギーの生産項Pkに対しては、Table.3中のRevised LK modelを、 $\langle u_3' \rangle$ の評価にはTable.4中の(6)式を用いた。

Table.3 Model equations of Revised LK model^{文3)}

1. Standard k- model:

$$P_i = n_i S^2 \quad (1) \quad n_i = C_n \frac{k^2}{e} \quad (2) \quad S = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2} \quad (3)$$

2. LK model:

$$P_i = n_i S \Omega \quad (4) \quad (n_i : eq.(2)) \quad \Omega = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2} \quad (5)$$

3. Revised LK model:

$$P_i = n_i S^2 \quad (\Omega/S > 1 \text{ の場合}) \quad (1)$$

$$P_i = n_i S \Omega \quad (\Omega/S < 1 \text{ の場合}) \quad (4)$$

Table.4 Models for vertical heat flux $\langle u_3' q' \rangle$ including buoyancy effects^{文3),4)}

$$-\langle u_3' q' \rangle = \frac{n_i}{s_q} \frac{\partial \langle q \rangle}{\partial x_3} + \frac{k}{e} C_{q_3} g_3 b \langle q'^2 \rangle \quad (6)$$

$$C_{q_3} = 0.25, \quad s_q = 0.5$$

注4)樹木の流体力学的効果を再現するために、Table.5に示す F_i を運動方程式の、 F_k をkの輸送方程式の、さらに F_e を粘性消散率の輸送方程式の各々右辺に付加した。

Table.5 Additional terms incorporating the effects of tree canopy^{文5),6)}

(F_i, F_k, F_e)

F_i	$h C_{p_i} a \langle u_i \rangle \sqrt{\langle u_j \rangle^2}$	(7)
F_k	$\langle u_i \rangle F_i$	(8)
F_e	$\frac{e}{k} \cdot C_{p_e} F_k$	(9)

ここで、 λ : 緑被率(1つの計算格子の中の樹木の占める領域の割合)[-], C_{p_i} : 樹幹の抵抗係数(今回の解析では0.3 ~ 0.4を与えた)[-], a : 樹幹の葉面積密度[m²/m³], C_{p_e} : モデル係数(今回の解析では文6)を参考に2.0とした)[-]

注5)公園内の各種樹木下で測定した透過日射量をもとに、Canopy層の日射減衰がUchijimaの式に従うと仮定し、次式より樹冠の葉面積密度 a を求めた。

$$a = -\ln(t)/k\ell$$

ここで、 a : 樹冠の葉面積密度 [m²/m³](本解析では樹種により1.0 ~ 3.0の範囲), t : 樹冠の日射透過率 [-], k : 消散係数(=0.6) [-], ℓ : 日射が透過する樹冠部分の長さ[m]

注6)自動車からの人工排熱量は、文7)を参考に82.8W/m²とした。
 注7)具体的には、Case1(公園有)とCase2(公園無)の各々について、公園北側の境界面から市街地へ流出する気流の温度と基準温度^{注8)}との温度差とその面を通る風量から、各ケースの移流フラックスを求め、両者の差(Case2-Case1)を求めた。
 注8)基準温度には、解析領域内の公園北側に位置する仙台管区気象台のデータを用い、28.2とした。

本論文で用いた主な記号
 $\langle \rangle$: アンサンブル平均

- u_i (i=1,2,3): 風速[m/s]
- x_i (i=1,2,3): 空間3方向の座標[m]
- i (i=1: 東西方向, i=2: 南北方向, i=3: 鉛直方向)
- θ : 温度[]
- ϵ : 対流熱伝達率[W/m²K]
- $a(x_1, x_2, x_3)$: 樹幹の葉面積密度[m²/m³]
- C_{p_i} : 樹幹の抵抗係数($C_{p_i}=0.3 \sim 0.4$)[-]
- k : 葉群の消散係数(=0.6) [-]
- ℓ : 日射が透過する樹冠部分の長さ[m]
- λ : 緑被率(1つの計算格子の中の樹木の占める領域の割合)[-]

[参考文献]

文1)佐々木他: 都市内公園緑地の暑熱緩和効果に関する研究, 建築学会東北支部研究報告集計画系, 第64号, pp.95-98, 2001.6
 文2)佐々木他: 都市内公園緑地の暑熱緩和効果に関する研究(その1), 建築学会学術講演梗概集 D-1, pp.901-904, 2001
 文3)吉田他: 対流・放射・湿気輸送を連成した屋外環境解析に基づく緑化の効果の分析, 建築学会計画系論文集, No.529, p.77-84, 2000.3
 文4)野口他: k-モデルの乱流熱フラックスの評価への浮力効果の組み込み, 建築学会学術講演梗概集 D, pp.65-66, 1994
 文5)吉田他: 樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外温熱環境緩和効果の検討 建築学会計画系論文集, NO.536, pp.87-94, 2000.10
 文6)加藤他: 植生 canopy モデルを組み込んだ k-モデルによる単独樹木周辺の風速分布の予測, 建築学会学術講演梗概集 D-1, pp.929-930, 2001
 文7)渡辺他: 都市の人工排熱放出に関する研究, 建築学会学術講演梗概集 D-1, pp.957-958, 1995.8