

数値解析による大規模緑地のヒートアイランド緩和効果の検討

Heat island mitigation effect of the large scale green area using numerical simulation

- H.B.リジャル, 東京大学, 目黒区駒場 4-6-1, E-mail: rijal@iis.u-tokyo.ac.jp
大岡龍三, 東京大学生産技術研究所, 目黒区駒場 4-6-1, E-mail: ooka@iis.u-tokyo.ac.jp
黄弘, 清華大学, 北京, 100084, 中国, E-mail: hhong@tsinghua.edu.cn
香月壮亮, 東京大学生産技術研究所, 目黒区駒場 4-6-1, E-mail: wtakeaki@iis.u-tokyo.ac.jp
呉秉哲, 東京大学, 目黒区駒場 4-6-1, E-mail: ohbc@iis.u-tokyo.ac.jp
- H.B. Rijal, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba Meguro-ku, 153-8505 Tokyo Japan
Ryozo Ooka, I.I.S., The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba Meguro-ku, 153-8505 Tokyo Japan
Hong Huang, Tsinghua University, Beijing, 100084, China
Takeaki Katsuki, I.I.S, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba Meguro-ku, 153-8505 Tokyo Japan
Byoungchull Oh, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba Meguro-ku, 153-8505 Tokyo Japan

Abstract: The effect of a large-scale green area is expected to mitigate the urban heat island. However, most the researches are based on the measurement, and there are only a few researches regarding the numerical simulation. In order to investigate the effect of the thermal mitigation of the large-scale green area, the tree model was built into the general purpose CFD code. The air temperature of an urban block with large scale green area is approximately 1.5 °C lower than the without green area. The result showed that the large scale green area is effective to mitigate the urban heat island.

1. はじめに

都市のヒートアイランド緩和策として緑地の効果が期待されており, 屋上緑化, 壁面緑化, 街路樹, 公園, 森林などを対象とした研究が多くみられる。特に大規模緑地においては, そのクールスポットとしてのマスの大きさとともに, にじみ出し現象など広域への効果が期待されている。表 1 に既往の大規模緑地の温熱環境緩和効果の研究の事例を示す^{(1)~(11)}。しかしながら, その殆どの研究が実測に基づいており, 数値解析を用いた研究は少ない。そこで, 本研究では実街区を対象とし, 汎用 CFD コードに樹木モデルを組み込み大規模緑地 (青山墓地) による市街地へのヒートアイランド緩和策を定量的に明らかにする。大規模緑地が都市全体の気温の緩和効果に有効であれば, 温熱環境の観点からも緑地の保全ができ, 新しい都市計画にも活用できると思われる。

2. 樹木モデルの検討

樹木が夏季の温熱環境に複合的影響を与える。樹木による日射減衰効果, 長波放射減衰効果, 蒸発潜熱の発生があり, 都市の温熱環境の緩和に期待されている。しかし, 樹木による水蒸気の発生, 風速低減効果もあり, その影響を検討する必要がある。本報では, 著者らが開発した樹木モデル⁽¹²⁾をベースにそのモデルがより広く活用されることを目的に, 汎用 CFD ソフト Star CD と汎用放射解析ソフト RADX に組み込んだ。以下に今回利用した「樹木モデル」の概要について述べる。

2.1 樹木を考慮した熱移動解析

(1) 樹木の放射の取り扱い

樹冠の放射減衰効果のモデル化に放射束の樹冠に対する透過距離と葉面積密度を考慮した輻射フラックスの吸収を用い, 吸収係数から有効透過率を算出した。

$$\tau_{eff} = \exp(-kax) \quad (1)$$

τ_{eff} : 有効透過率, k : 吸収係数[-], a : 葉面積密度[1/m], x : 透過距離[m]である。

(2) 樹木の対流の取り扱い

樹木による流体力学抵抗の考慮は風速の運動方程式に式(2)を追加した。乱流エネルギーと散逸率も同時に考慮した。

$$\eta C_d a (x_1, x_2, x_3) \langle u_i \rangle \sqrt{\langle u_j \rangle^2} \quad (2)$$

C_d : 樹冠の抵抗係数 ($C_d = 0.2$) [-]

$a(x_1, x_2, x_3)$: 樹冠の葉面積密度[m²/m³]

η : 緑被率 (樹木を含むメッシュの水平面積のうち樹木で覆われている水平面積の割合) [-]

表 1 既往研究における大規模緑地の緩和効果の比較

場所	方法	季節	気温 (表面温度) [°C]	文献
東京	実測	夏	公園は街区より 12~2.1°C低い	(1)
東京	実測	夏	明治神宮の森の気温は周辺街区より最大 4°C低い	(2)
東京	実測	夏	新宿御苑の気温は昼夜とも市街地より 1~3°C低い	(3)
東京	計算	夏	日最高気温で 0.4°C, 日平均で 0.2°C低い	(4)
名古屋	計算	夏	市街地の気温は昼夜とも約 1.0°C低い	(5)
京都	実測 計算	夏	樹木の周辺の気温は街区より 0.9°C低い	(6)
熊本	実測	春/夏	緑地の中の気温は外より最大 3°C低い (緑地の表面温度は周辺より 15~20°C低い)	(7)
シンガポール	実測	夏	樹木のキャノピの気温は周辺より 1.5~2°C低い (樹木のキャノピの表面温度はコンクリートより 7.8°C低い)	(8)
シンガポール	実測 計算	夏	公園の気温は街区より 0.4~1.7°C低い	(9)
シンガポール	実測 計算	夏	公園の気温は街区より 3~4°C低い	(10)
メキシコ	実測	雨/乾	公園の気温は街区より 1.0~4.0°C低い	(11)

樹木からの顕熱・潜熱発生の考慮は放射計算で得られた樹冠での熱収支より流出する顕熱輸送量と潜熱輸送量をそれぞれ温度の輸送方程式と絶対湿度の輸送方程式に発生項として、組み込む。詳しくは文献(12)参照。

2.2 樹木を考慮した簡易解析例

(1) 解析対象モデル

図1に解析対象モデルを示す。計算領域は10m×10m×10mであり、樹木のサイズは3.33m×3.33m×3.33mである。流入風速は1m/sであり、流入気温は31.6°Cである。評価時間は午後3時とした。樹木は空中に浮いた立方体とし、本研究では樹幹による影響を無視した。その他の計算概要は次節に示す。

(2) 計算結果

図2に樹木の表面温度分布を示す。午後3時の計算結果であるため、日射の影響による樹木の西面・上面の表面温度が南面よりも高くなっている。樹木の東面・北面の表面温度は最も低くなっている。また、照り返しの影響による樹木の下面の表面温度が高くなっている。地表面温度は樹木の日陰の有無によって大きく異なっており、その差が10°C以上ある(図3)。太陽は南西にあるため、北東の地表面温度が低くなっている。樹木が風速の障害物になるため、樹木の中や風下側の風速が低下している(図4)。気温の鉛直分布は樹木中心で最も低い(図5)、絶対湿度の鉛直分布は樹木中心で最も高い(図6)。この「樹木モデル」を用いて次節で「大規模緑地」の緩和効果を検討する。

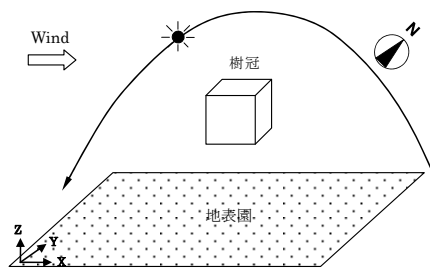
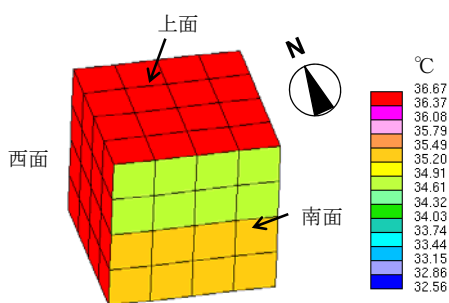
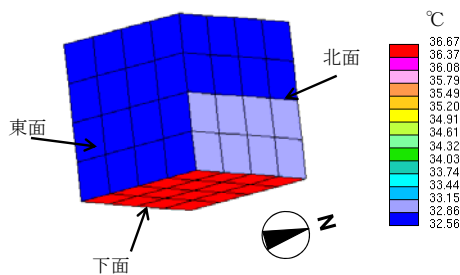


図1 解析対象モデル



(a)南・西・上面



(b)北・東・下面

図2 樹冠の表面温度分布

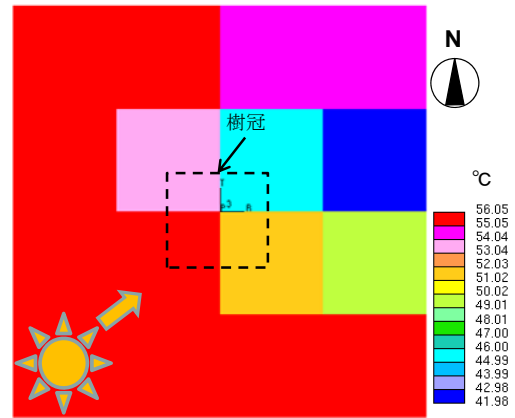


図3 地表面温度分布

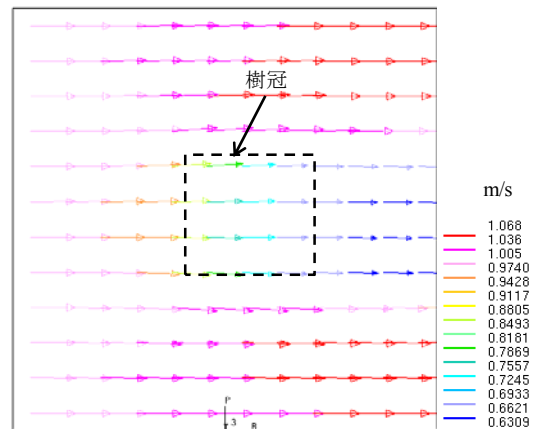


図4 風速の鉛直分布

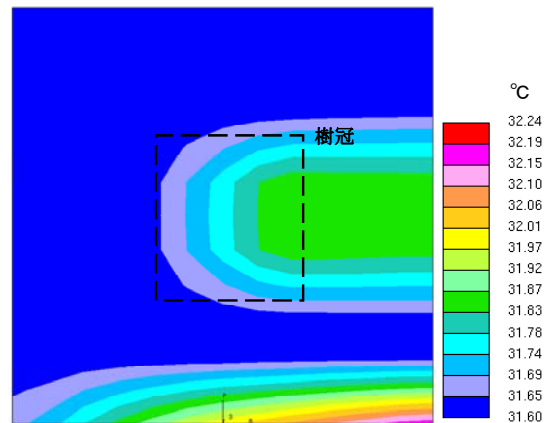


図5 気温の鉛直分布(樹木中心断面)

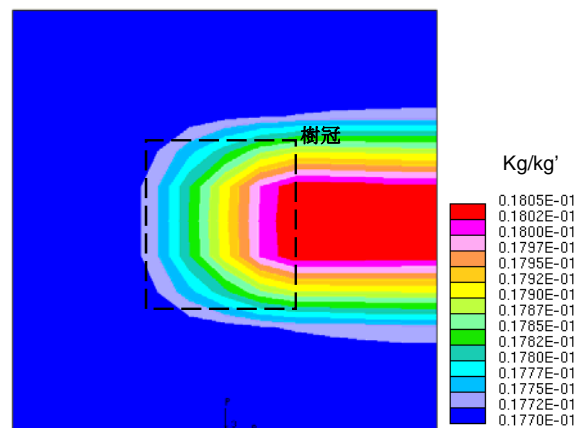


図6 絶対湿度の鉛直分布(樹木中心断面)

3. 実街区における「大規模緑地」の検討

3.1 対象地域概要

検討対象地域の南青山は一戸建て住宅、高層アパート、オフィスビル、商業ビルなどから構成されている複合地域である(図7)。地域内に公園が点在し、周辺には西側に青山墓地、北側に神宮外苑、赤坂御所といった大規模緑地が存在する。本研究では「青山墓地」を「大規模緑地」としてモデル化した。高層アパートの下は植林されていて、開放的な屋外空間になっている。大通りから路地に入ると、住宅地が広がっている。殆どの建物がコンクリート造であるが、木造住宅も多少ある。一部のオフィスビルでは空調機は地上に置かれており、歩行空間に排熱されている。

3.2 計算概要

本研究では、放射・対流連成シミュレーションを用いた^{(12), (13)}。まず放射計算を行い、その結果を用いて対流計算を行う。GIS データを元に CAD で街区モデルを作成する。これを格子生成ソフトで非構造格子を作成する(図8)。放射計算には CD Adapco 社の RADX を用い⁽¹⁴⁾、対流計算には同社の汎用流体ソフト Star CD を用いた。乱流モデルは標準 $k-\epsilon$ モデルである。表2に気象条件、表3に放射計算の条件を示す。対象時刻は夏期晴天日の午後3時を対象とした。風向・風速については、南西の風、高さ74.6mにおいて風速3m/s、気温31.6°C、水蒸気分圧2.8kPaとして流入境界条件を設定した。放射計算は非定常で行い、15時間の助走時間を設けた。放射計算から得られた表面温度を対流計算の境界条件とした。表4にCFDの計算条件を示す。計算領域は1591m×1668m×600mで、緑地があるモデルの計算メッシュ数は354,070である。本研究では大規模緑地(青山墓地)の有無の2ケースを検討する。大規模緑地の面積は195,255m²と想定した。樹幹は地上高さ4mで、樹冠の高さは15mとした。



図7 対象地域の全体像

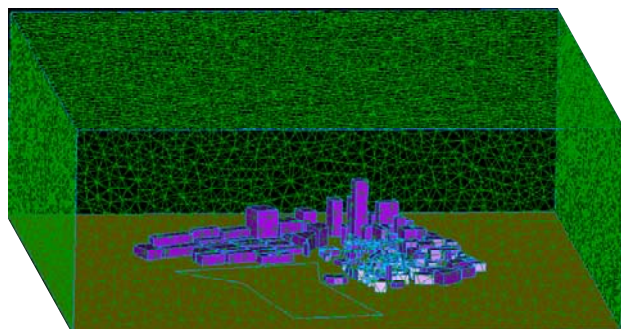


図8 計算モデル

表2 気象条件

日時	7月23日 15:00
風向	南西
風速	3m/s(地上高さ74.6m)
気温	31.6°C
法線面直達日射	765 W/m ²
天空日射	136 W/m ²

表3 放射計算の条件

建物	壁面	コンクリート
	日射反射率	0.1
	透過率	0
	厚さ	0.22m
	熱伝導率	1.64 W/(m.K)
	室内対流熱伝達率	4.64 W/(m ² .K)
	室温	26°C
地面	長波放射率	0.9
	地面	アスファルト
	日射反射率	0.1
	長波放射率	0.9
地中	0.5m以下は26°Cに固定	

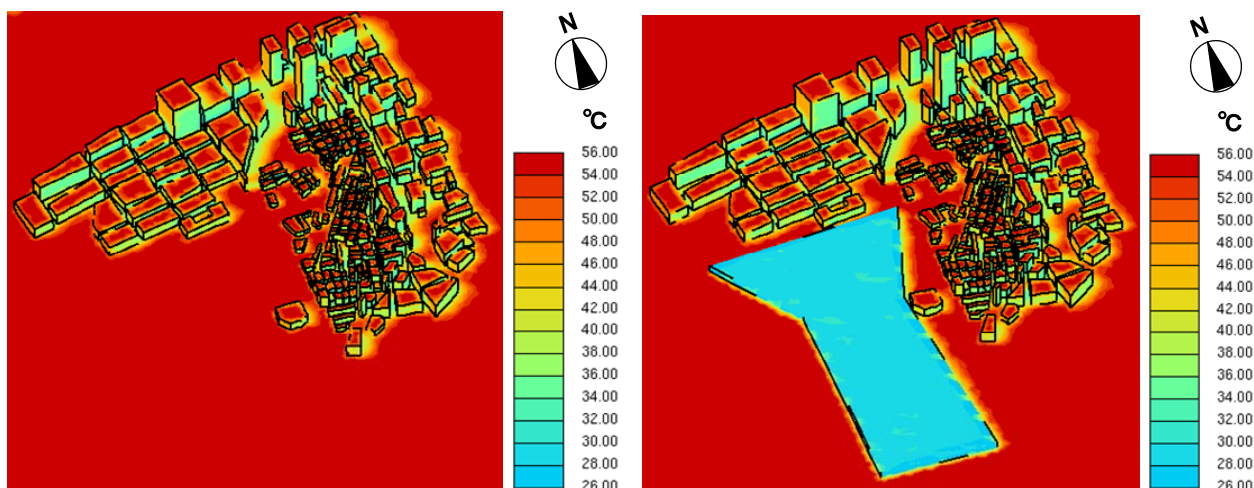
表4 CFDの計算条件

乱流モデル	標準 $k-\epsilon$ モデル
離散化	有限体積法
アルゴリズム	SIMPLE 法
差分スキーム	風上一次差分
側面条件	No Slip
天空面, 流出条件	Slip
壁面	一般化対数則
流入風速	$U = U_0(Z/Z_0)^{1/4}$, $Z_0=74.6m$, $U_0=3.0m/s$ Z_0 : 基準高さ(気象データの観測高さ)[m] U_0 : Z_0 における風速 [m/s] Z : 地上からの高さ [m] U : Z での風速 [m/s]
乱流エネルギー(k)	$k=1.5(\langle u^2 \rangle)^2$, $I=0.1$ $\langle u^2 \rangle$: 風速のアンサンブル平均 I : 乱れの強さ
kの散逸率(ϵ)	$\epsilon=C_{\mu}k^{3/2}/l$, $C_{\mu}=0.09$
乱流の特徴的長さスケール(l)	$l=4(C_{\mu}k)^{0.5}Z_0^{0.25}Z^{0.75}/U_0$

3.3 計算結果

(1) 表面温度の分布

図9に放射計算から得られた15時の表面温度分布を示す。地表面や建物の表面温度は日射の影響により日向と日陰で大きく異なっている。15時に太陽が南西方向にあるため表面温度が南西壁で高くなっている。屋上に直達日射が当たるため表面温度が56°Cまで上昇している。地表面は日向では約54°C、日影では約42°Cになっている。大規模緑地は蒸発散作用のため表面温度が約28°Cと低い。緑地の表面温度は周辺より15~20°C低いという既往研究とも類似している(表1)。これらの表面温度を境界条件として流体計算を行った。



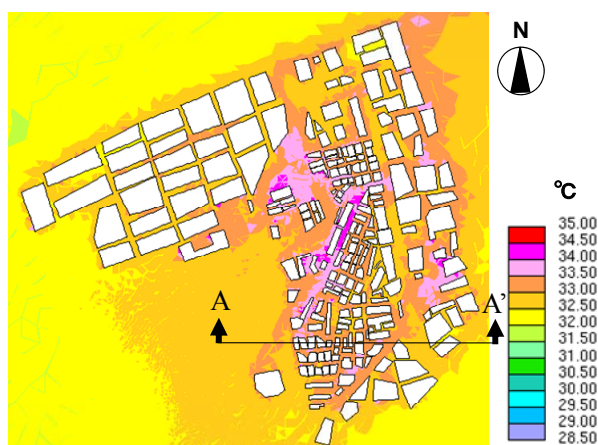
(a) 緑地なし

(b) 緑地あり

図9 緑地の有無による表面温度分布 (15:00)

表5 全計算領域における気温と風速の平均値と標準偏差 (SD)

高さ[m]	メッシュ の数	気温 [°C]				風速 [m/s]				相関係数(r)			
		緑地なし(T)		緑地あり(T_g)		緑地なし(V)		緑地あり (V_g)		有意水準 : $p < 0.001$			
		平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD	$T:T_g$	$V:V_g$	$T:V$	$T_g:V_g$
1.5	8,801	32.5	0.4	31.2	1.2	2.0	0.4	1.2	1.3	0.17	0.50	-0.60	0.41



(a) 緑地なし



(b) 緑地あり

図10 緑地の有無による地上1.5mにおける気温分布(15:00)

(2) 気温分布

地上1.5mにおける気温分布を図10に、緑地の有無による気温の差を図11に示す。気温の平均値と標準偏差を表5に示す。表面温度が高い場所の近傍では気温も高い。大規模緑地の気温は緑地がない場合より最大4.0°C低く(緑地の中央部)、森や公園の気温は周辺より3~4°C低いという既往研究の実測結果とも一致している(表1)。大規模緑地の近くの街区の気温は緑地がない街区に比べ約1.5°C低下しており、大規模緑地による気温の低減効果がみられた。緑地の冷気が住宅地内部まで運ばれており、緑地に近い程度気温低下が大きい(図11)。大規模緑地による気温の低減効果は街区全体(約500m)に広がっており、既往研究の80~1,000mという結果とも類似している(表6)。建物が密集している空間(路地, 狭い空間)では風通しが悪く、熱が溜まりやすいため、気温が最も高くなっている。逆に、開放的な空間(大通り, 空地)では風通しが良いため、気温が比較的低温になっている。

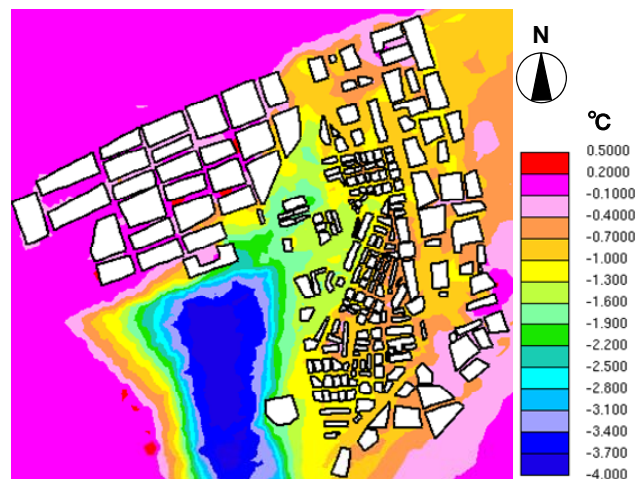
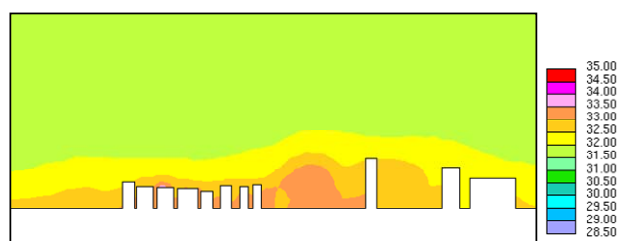


図11 緑地の有無による温度差 (地上1.5m, 15:00)

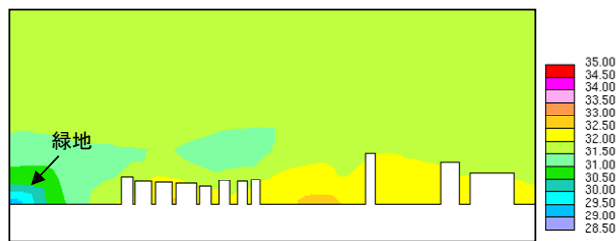
図 12 に A-A'断面における気温の鉛直分布を示す。鉛直方向の気温分布は上空に行くほど低く、地表面付近では不安定成層が形成されていることが分かる。緑地がない場合では、地上から建物高さまで気温が高くなっているのに対して、緑地がある場合は全領域で気温が低くなっている。緑地がある場合、地上付近ほど気温が低くなっており、大規模緑地の効果が地上高さ 100m まで及んでいる (図 13)。緑地有無の気温の相関関係が高く、街区全体の緑地の緩和効果は回帰式を用いて推定できる (図 14)。

表 6 夏における大規模緑地による気温低減効果の範囲

場所	方法	範囲 (m)	文献
東京	既往実測	80~250	(3)
日本の都市を想定	既往計算	300~400	(15)
東京	既往実測	700~1000	(16)
東京	既往計算	100	(17)
東京	本計算	500	本研究



(a) 緑地なし



(b) 緑地あり

図 12 緑地の有無における A-A'断面(図 10)の気温の鉛直分布

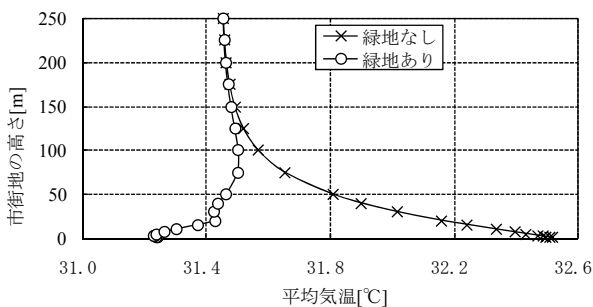


図 13 街区全体の鉛直方向の気温分布

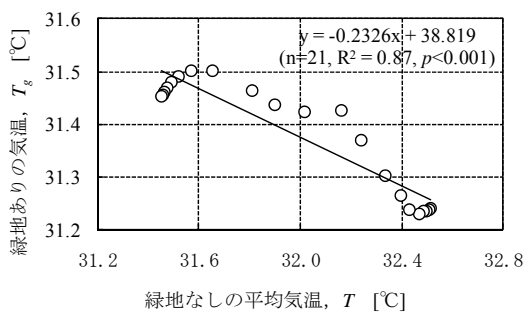
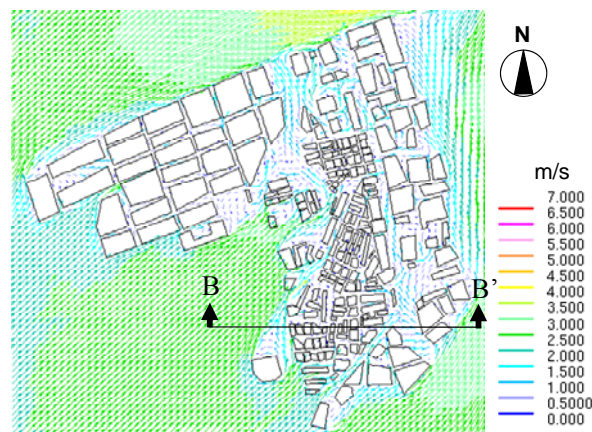


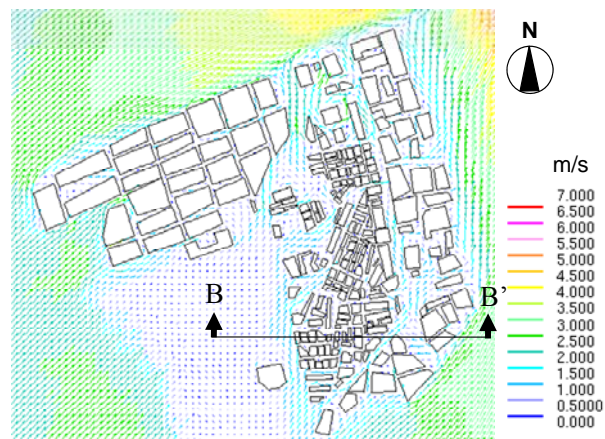
図 14 街区全体の緑地有無の気温の相関関係

(3) 風速分布

地上 1.5m における速度ベクトルを図 15 に、緑地有無による風速スカラーの差を図 16 に示す。風速の平均値と標準偏差を表 5 に示す。対象地域の風速は開放的な空間では大きいのが、建物が密集している空間では小さい。これは既往研究の結果とも一致する⁽¹⁸⁾。南西から北東に流れる風によって大規模緑地で発生した冷気を対象市街地に運ばれていることが確認できる。緑地有無の風速分布は大きく異なっており、緑地がある場合の風速は緑地がない場合より殆どの場所で低くなっている (図 16)。緑地があることによって緑地内部やその周辺の風速が特に低下している。



(a) 緑地なし



(b) 緑地あり

図 15 緑地の有無による地上 1.5m における風速分布(15:00)

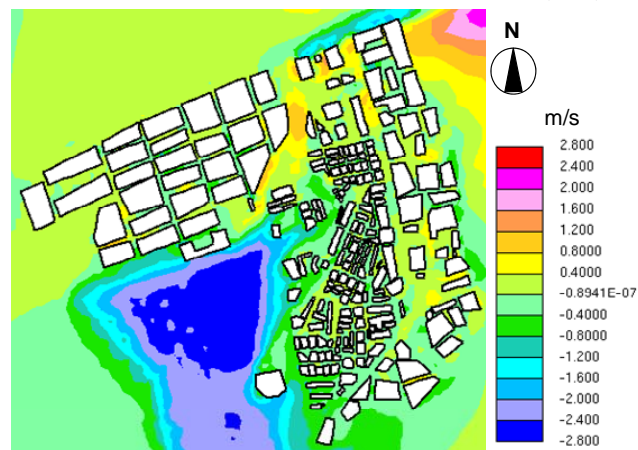
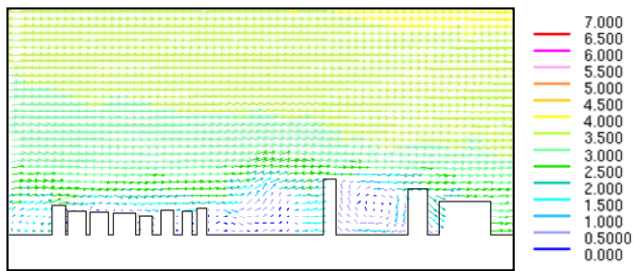


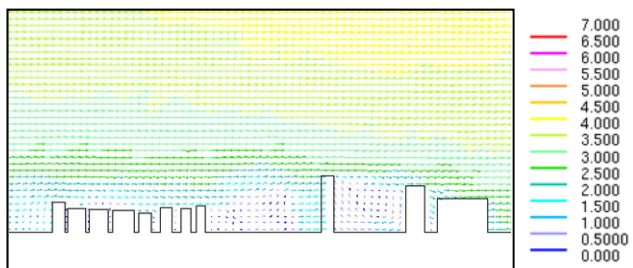
図 16 緑地の有無による風速の差 (地上 1.5m, 15:00)

図 17 に B-B' 断面における風速ベクトルの鉛直分布を示す。緑地がない場合の風速が大きいため、建物の風下側で緑地がある場合より強い渦が発生している。

街区全体の緑地有無の風速を比較するために、図 18 に鉛直方向の風速を示す。参考のため、べき乗則の風速も示す。特に、大規模緑地があることによって、地上 50m 以下の風速は緑地がない場合やべき乗則の風速より小さくなっている。緑地有無の風速の相関関係が高く、大規模緑地による街区全体の風速の減少は回帰式を用いて推定できる (図 19)。



(a) 緑地なし



(b) 緑地あり

図 17 緑地の有無における B-B' 断面 (図 15) の風速の鉛直分布

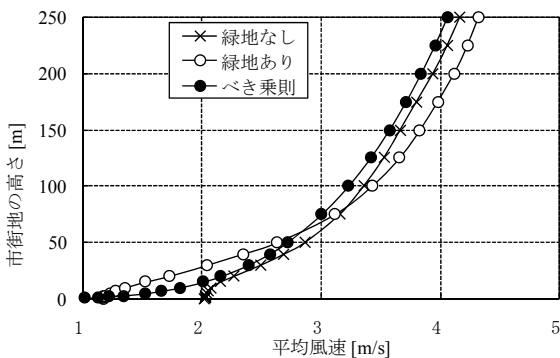


図 18 街区全体の鉛直方向の風速分布

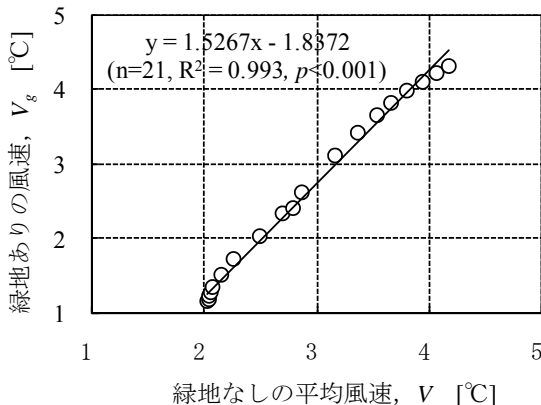


図 19 街区全体の緑地有無の風速の相関関係

4. まとめ

東京都内の大規模緑地のヒートアイランド緩和効果について数値解析を行い、以下のことが明らかになった。

- (1) 大規模緑地の表面温度は周辺より 15~20°C低いという既往研究の結果と類似している。
- (2) 大規模緑地があるモデルの気温は緑地がないモデルより最大 4.0°C, 平均 1.3°C低い。
- (3) 大規模緑地の周辺の街区の気温は緑地がない街区より約 1.5°C低く、大規模緑地がヒートアイランド緩和効果に有効であることが定量的に確認された。
- (4) 緑地有無の気温の相関関係が高く、街区全体の緑地の緩和効果は回帰式を用いて推定できる。
- (5) 大規模緑地から対象地域の広範囲 (約 500m) へ冷気が流れてくることが示された。
- (6) 大規模緑地による市街地の風速は緑地がない場合より小さい。両者の相関関係が高く、大規模緑地による街区全体の風速の減少は回帰式を用いて推定できる。
- (7) 今後は SET*などの温熱環境評価を行う予定である。

参考文献

- (1) 尹龍漢, 丸田頼一, 本條毅, 桃井重人: 東京における公園内外の気温分布特性について, *ランドスケープ研究*, 61 (5)(1998), pp. 769-772.
- (2) 神田学, 森脇亮, 高柳百合子, 横山仁, 浜田崇: 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 (10)(1997), pp. 713-722.
- (3) 成田健一, 三上岳彦, 菅原広史, 本條毅, 木村圭司, 桑田直也, 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*, 77-6 (2004), pp. 403-420.
- (4) 三上岳彦, 若林明子, 宇田川満, 伊藤政志: 東京のヒートアイランドに関する研究 (その 2): ヒートアイランド改善対策とその効果, *東京都環境科学研究所年報* (1997), pp. 49-56.
- (5) 水鳥雅文, 田村英寿, 丸山康樹: 名古屋市とその周辺地域における熱環境シミュレーション, *環境システム研究*, 22 (1994), pp. 292-299.
- (6) Takahashi K., Yoshida H., Tanaka Y., Aotake N. and Wang F.: Measurement of thermal environment in Kyoto city and its prediction by CFD simulation, *Energy and Buildings*, 36 (2004), pp. 771-779.
- (7) Saito I., Ishihara O. and Katayama T.: Study of the effect of green areas on the thermal environment in an urban area, *Energy and Buildings*, 15-16 (1990/91), pp. 493-498.
- (8) Nichol J.E.: High-resolution surface temperature patterns related to urban morphology in a tropical city: A satellite-based study, *Journal of Applied Meteorology*, 35 (1996), pp. 135-146.
- (9) Yu C. and Hien W.N.: Thermal benefits of city parks, *Energy and Buildings*, 38 (2006), pp. 105-120.
- (10) Wong N.H., Jusuf S.K., Win A.A.L., Thu H.K., Negara T.S. and Xuchao W.: Environmental study of the impact of greenery in an institutional campus in the tropics, *Building and Environment*, 42 (2007), pp. 2949-2970.
- (11) Jauregui E.: Influence of a large urban park on temperature and convective precipitation in a tropical city, *Energy and Buildings* 15-16 (1990/91), pp. 457-463.
- (12) 吉田伸治, 大岡龍三, 持田灯, 富永禎秀, 村上周三: 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, *日本建築学会計画系論文集* 536 (2000), pp.87-94.

- (13) Huang H., Ooka R. and Kato S.: Urban thermal environment measurements and numerical simulation for an actual complex urban area covering a large district heating and cooling system in summer, *Atmospheric Environment*, 39 (2005), pp. 6362-6375.
- (14) 大岡龍三, 陳宏, 黄弘, 中嶋まどか: 対流・放射連成解析を用いた建物壁面からの顕熱放散や建物の人工排熱の屋外温熱環境への影響度に関する研究, 第 19 回風工学シンポジウム論文集 (2006), pp. 91-96.
- (15) Honjo T. and Takakura T.: Simulation of thermal effects of urban green areas on their surrounding areas, *Energy and Buildings*, 15-16 (1990/91), pp. 443-446.
- (16) Ca V.T., Asaeda T. and Abu E.M.: Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park, *Energy and Building*, 29 (1998), pp. 83-92.
- (17) Shashua-Bar L. and Hoffman M.E.: Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees, *Energy and Buildings*, 31 (2000), pp. 221-235.
- (18) Rijal H.B., Ooka R., Huang H., Katsuki T. and Oh B.: Evaluation of wind environment under isothermal and non-isothermal conditions in an urban block using CFD simulation, *Proceedings of the 3rd International Conference on Environmentally Sustainable Development*, Vol. 1 (2009), pp. 43-53, 16-18 August, Pakistan.