

特集 「数値解析技術」

数値都市気候モデル「Appias（アッピラス）[®]」の開発

片岡 浩人 大塚 清敏 赤川 宏幸
小野 佳之 川口 彰久

Development of “Appias”: A Numerical Urban Climate Simulator

Hiroto Kataoka Kiyotoshi Otsuka Hiroyuki Akagawa
Yoshiyuki Ono Akihisa Kawaguchi

Abstract

The rising temperatures in urban area due to heat island phenomena have posed problems for people residing or working in these areas, and various proposals have been put forth to mitigate it. When mitigation measures are proposed as a part of new building plans, their validity can be enhanced if people understand how such measures bring about quantitative improvement in the outdoor environment. The Comprehensive Assessment System for Building Environment Efficiency (CASBEE) recommends a survey of current thermal environmental conditions and the evaluation of appropriate mitigation effects on the basis of computational fluid dynamics (CFD) studies. Combining CASBEE recommendations with CFD methods has resulted in development of a numerical urban climate simulator known as “Appias.” This system can confirm the effectiveness of various measures and predict the outdoor thermal environment under those measures. Appias comprises the following different numerical models: Appias-Meso for meso-scale meteorological phenomena, Appias-M for urban-scale, and Appias-E for building-scale considerations. In this paper, the outlines of each numerical models are explained and some proposed mitigation solutions and their expected effects predicted by Appias are described.

概要

近年、ヒートアイランド現象による都市域の気温上昇が問題となり、各種のヒートアイランド緩和対策技術が提案されている。新たな建物計画に対して緩和対策技術を提案する際、その導入効果を定量的かつ目に見える形で予測評価ができれば、その有効性を多くにアピールする事が出来る。また建築物総合環境性能評価システム（CASBEE）では、温熱環境の事前調査や緩和対策の効果確認において、流体数値シミュレーションの利用を薦めている。そこで、緩和対策技術の効果確認と、市街地の屋外熱環境の予測を目的として、数値都市気候モデル「Appias（アッピラス）」の開発を行なった。同ソフトは、メソスケールの気象現象を対象としたAppias-Meso、都市域を対象としたAppias-M、建物スケールを対象としたAppias-Eで構成されている。ここでは、Appiasの各モデルの概要を説明し、緩和対策技術の効果を確認を目的とした適用事例を示す。

1. はじめに

都市化の進展に伴い顕著となったヒートアイランド現象は、夏季に気温上昇をもたらすことで、屋外熱環境の悪化による熱中症患者の増加¹⁾や、冷房負荷増大とそれにもなるCO2排出量の増加につながる。さらに近年は、都市部でのゲリラ型集中豪雨の出現²⁾などとも関連づけられている。

このヒートアイランド現象の形成要因として、1) 地表面被覆の変化（緑地の減少やアスファルト舗装の増大など）、2) 人工排熱の増大、3) 建物の高層化に伴う地表面付近の風速低下があげられる³⁾。ヒートアイランド現象緩和を目的とした対策技術も、以下に示すようにこれらの要因別に各種提案されている。

1) 地表面被覆の変化に対しては、a) 緑地や水面の再生、b) 建物の屋上や壁面の緑化、c) 道路表面の湿潤化、

d) 屋根や地表面での塗装や素材の改良による日射の反射や遮熱といった緩和対策技術がある。それぞれに大林組の保有技術としてa) ビオトープ、b) グリーンキューブ、グリーンキューブ・ウォール、c) 打ち水ロード、打ち水ペープ、打ち水グラスパーク、d) サンバリアが開発されている。

2) 人工排熱の増大に対する対策には、建物の省エネルギー化に関連する各種の技術が含まれる。また熱源機器からの放熱に際し潜熱を利用することも、対策技術とみなすことができる。

3) 建物の高層化に伴う地表面付近の風速低下に関しては、東京都の臨海部に建設された高層建物群が海風の侵入を妨げ、それが都心のヒートアイランド形成の一因とみなした報道がなされている⁴⁾。しかし、建物単体での対策には限界があり、街区あるいは地域単位での対策が必要である。例えば、地域の風向特性に応じた建物高さ

制限⁵⁾やグロス建蔽率の設定⁶⁾,あるいは河川を利用した換気効率の改善が提案されている⁷⁾。

ところで,新たな建物計画に対して上記のようなヒートアイランド現象の緩和対策技術を提案する際,その導入効果を定量的かつ目に見える形で予測評価ができれば,その有効性を多いにアピールする事が出来る。また,建築物が周辺環境に与える影響を総合的に評価する手法として,建築物総合環境性能評価システムCASBEE (Comprehensive Assessment System for Building Environment Efficiency)⁸⁾が提案されている。同評価手法では,温熱環境の事前調査やヒートアイランド緩和対策の効果確認において,広域大気環境予測システムや流体数値シミュレーションの利用に対して評価ポイントによるインセンティブを与えている。

そこで,ヒートアイランド緩和対策技術の効果確認と,市街地の屋外熱環境の予測を目的として,数値都市気候モデル「Appias (アッピラス)」の開発を行なった。同ソフトでは,メソスケールの気象現象から,建物スケールまで,様々な規模の現象に対応した複数の数値モデルから構成されている。また市販の電子地図を用いて計画建物や周辺建物のモデル化を簡易化し,かつ直交等間隔格子の採用で格子生成作業を単純化している。

本報ではまずAppiasで用いられている数値解析手法の概要を説明する。次に,樹木による冷却効果のモデル化についての検証例を示す。最後に緩和対策技術の効果を確認を目的とした適用事例を示す。

2. 「Appias (アッピラス)」の概要

2.1 Appiasの構成

数値都市気候モデル「Appias (アッピラス)」の構成をFig. 1に示す。Appiasは, Appias-Meso, Appias-M, Appias-Eの3つの解析モデルで構成されていて,以下のように対象となる現象のスケールに応じて選択される。

- Appias-Meso 気象モデル, 数100km四方の領域
広域の分布, 中規模の気象現象
- Appias-M 工学モデル, 10km四方の領域
都市域内の分布, 風の道の評価
- App-as-E 工学モデル, 1km四方の領域
街区内の分布, 各種ヒートアイランド緩和対策技術の効果確認

これらは上位のモデルの解析結果の時刻歴を境界値として用いることで,一方向のネスティングが可能である。またAppias-Eは,放射熱環境解析ソフトであるサーモレンダー⁹⁾と解析モデルや気象条件を共有し,壁面や地表面の温度分布をAppias-Eの境界条件として用いる。

以下ではFig. 1に示した結果を参照しながら,各モデルについて説明する。

2.2 Appias-Meso

海陸風など都市気候に影響を与える中規模の周辺気象

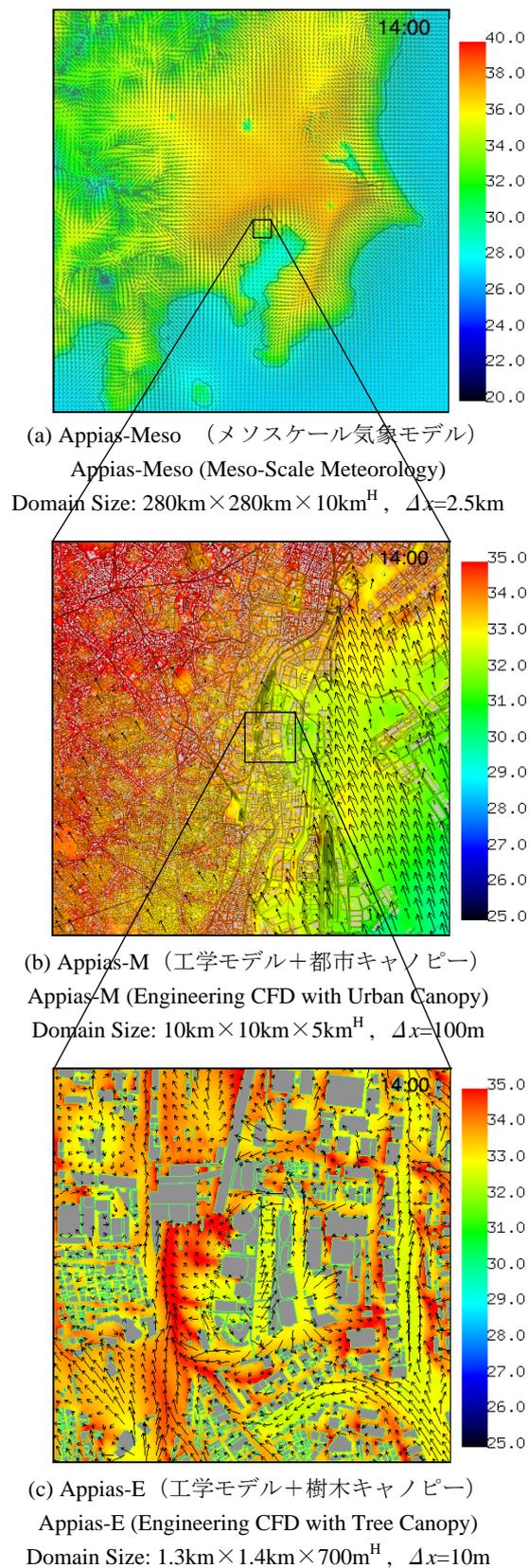


Fig. 1 Appiasの構成図(夏季の品川地区を対象とした解析事例: 気温[°C]・風速ベクトル分布)
Schematic Framework for Appias (Temperature and Wind Velocity Vector Results for Shinagawa Area in Summer).

現象を再現するためのモデルである。Table 1-3に基礎式を示す。ここで $\langle \phi \rangle$ は任意の変数 ϕ のレイノルズ平均、 ϕ' は乱れの成分 ($\phi = \langle \phi \rangle + \phi'$) である。また添字の*i*=1,2はそれぞれ*x*,*y*方向, 3は鉛直方向 (*z*方向) を示す。

Table 1は*z**座標系 (*x*,*y*,*z**)による座標変換の計量因子と全微分を示したもので、*z_g*: 地面標高, *H*: 計算領域高さ, (*u*,*v*,*w*): 気流速度成分, $\sqrt{G}\langle w^* \rangle$: *z**座標系での*z*方向速度 $\langle w \rangle$ である。

Table 2は非圧縮連続の式, 流れ場の式 (静水圧平衡を仮定しているので $\langle w \rangle$ は連続の式から求める), 静水圧平衡式, 仮温位 (水蒸気の効果を取り入れた温位) θ_v , 水蒸気混合比 q_v , 乱流エネルギー *k*ならびに長さスケール *l*の各輸送方程式である。浮力にはブシネスク近似を用いた。ここで *f*: コリオリ因子, *U_g*: 地衡風, ϵ_{ijk} (=1正巡回, =-1逆巡回, =0その他), Π : 無次元圧力 (基準圧力 $P_{00}=1$ 気圧), *C_p*: 定圧比熱, *R*: 気体定数, θ : 温位, *g*: 重力加速度 (-9.8m/s²), β : 空気の体膨張率である。

水平方向の渦粘性係数 *K_M* ならびに渦拡散係数 *K_H* には, やや単純化されたスマゴリンスキモデル¹⁰⁾を用いる。ただし鉛直方向はTable 3に示すMellor and Yamadaの乱流クロージャモデル¹¹⁾を用いた。ここで *S_M*, α はフラックスリチャードソン数 *Ri_f* の関数で与えられ, 大気安定度に応じて鉛直方向のフラックスを補正する。

地面では, 太陽・赤外放射熱収支とMonin-Obukhov相似則を仮定した安定度補正対数則から求められる乱流顕熱・潜熱フラックス, その他人工排熱, 地中熱伝導などの熱収支成分を考慮する。その際, 土地利用区分毎に, 粗度長さ, 人工排熱, 湿潤度, 地面反射率を定め, 各土地利用区分が格子の中で占める面積比の重み付け平均をとり地表面境界条件を設定する。また大気中では太陽放射, 赤外放射伝達や水蒸気の相変化による加熱・冷却効果を取り扱う。その他の境界条件ならびに解析の初期値には, 任意の初期条件, または気象庁の客観解析データを用いる。各輸送方程式の空間微分は全て2次精度の中心差分で離散化され, 時間積分はADI (Alternating Direction Implicit) 法で行う。

関東地方を対象として, 夏季の海陸風循環の解析を行った。計算領域は, 東西280km×南北280km×高さ8kmとし, 水平方向の格子解像度は2.5kmとした。地形は50mメッシュ標高¹²⁾により再現し, 土地利用区分には国土数値情報土地利用区分3次メッシュデータ (100mメッシュ)¹³⁾を用いた。Fig. 2に対象となる領域の地形と計算格子を示す。モデルの基本的な挙動を見るため, 静穏な大気を初期条件とし, 前日の21時から当日の24時までの27時間の解析を行なった。

Fig. 3に地上5m高さ, 5時の気温と風速ベクトル分布を示す。関東平野の背後にある山脈から東京湾に向かう気流となっている。このように夜間から早朝にかけては海よりも陸地の冷却が勝り, 関東平野から海に向かって弱い陸風が形成される。日の出後, 日射による陸面温度の

Table 1 *z**座標系による座標変換
*z** Coordinate System Transformation.

$$z^* = H \frac{z - z_g}{H - z_g} \quad \sqrt{G} = 1 - \frac{z_g}{H} \quad \sqrt{GG^{i3}} = \frac{\partial z_g}{\partial x_i} \left(1 - \frac{z_g}{H}\right) \quad \frac{\partial}{\partial z} = \frac{1}{\sqrt{G}} \frac{\partial}{\partial z^*}$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \langle u \rangle \frac{\partial}{\partial x} + \langle v \rangle \frac{\partial}{\partial y} + \langle w^* \rangle \frac{\partial}{\partial z^*}$$

$$\sqrt{G} \langle w^* \rangle = \langle w \rangle + \sqrt{GG^{13}} \langle u \rangle + \sqrt{GG^{23}} \langle v \rangle$$

Table 2 Appias-Mesoの基礎式
Basic Equations for Appias-Meso.

$$\frac{d\langle u_i \rangle}{dx_i} + \frac{\partial \langle w^* \rangle}{\partial z^*} = 0 \quad (u_1, u_2, u_3) = (u, v, w) \quad (U_{1g}, U_{2g}, U_{3g}) = (U_g, V_g, W_g)$$

$$\frac{d\langle u_i \rangle}{dt} = -C_p \langle \theta_v \rangle \frac{1}{\sqrt{G}} \left(\frac{\partial \sqrt{G} \Pi}{\partial x_i} + \frac{\partial \sqrt{GG^{i3}} \Pi}{\partial z^*} \right) + \epsilon_{ijk} f \langle u_j \rangle - U_{jg}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K_M \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial x_i} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ K_M \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial y} + \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial x_i} \right) \right\} + \frac{1}{\sqrt{G}} \frac{\partial \langle -w' u_i' \rangle}{\partial z^*}$$

$$C_p \langle \theta_v \rangle \frac{\partial \Pi}{\partial z^*} - g = 0 \quad \Pi = \langle p \rangle / P_{00} \quad \langle \theta_v \rangle = \langle \theta \rangle (1 + 0.61 \langle q_v \rangle)$$

$$\frac{d\langle \theta_v \rangle}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} (K_H \frac{\partial \langle \theta_v \rangle}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_H \frac{\partial \langle \theta_v \rangle}{\partial y}) + \frac{1}{\sqrt{G}} \frac{\partial \langle -w' \theta_v' \rangle}{\partial z^*}$$

$$\frac{d\langle q_v \rangle}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} (K_H \frac{\partial \langle q_v \rangle}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_H \frac{\partial \langle q_v \rangle}{\partial y}) + \frac{1}{\sqrt{G}} \frac{\partial \langle -w' q_v' \rangle}{\partial z^*}$$

$$\frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} (K_H \frac{\partial k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_H \frac{\partial k}{\partial y}) + \frac{1}{\sqrt{G}} \frac{\partial R_k}{\partial z^*}$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{G}} \langle -u' v' \rangle \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial z^*} - \langle u' w' \rangle \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial z^*} + \beta g \langle w' \theta_v' \rangle - \frac{k^{1.5}}{B_1}$$

$$\frac{d(2kl)}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} (K_H \frac{\partial (2kl)}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_H \frac{\partial (2kl)}{\partial y}) + \frac{1}{\sqrt{G}} \frac{\partial R_{2kl}}{\partial z^*}$$

$$+ \frac{IF_1}{\sqrt{G}} \langle -u' w' \rangle \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial z^*} - \langle v' w' \rangle \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial z^*} - \beta g \langle w' \theta_v' \rangle - \frac{k^{1.5}}{B_1} [1 + F_2 \left(\frac{l}{\kappa z}\right)^2]$$

$$\kappa = 0.4 \quad B_1 = 16.6 \quad F_1 = 1.8 \quad F_2 = 1.33$$

Table 3 Appias-Mesoの乱流拡散フラックス
Turbulence Fluxes for Appias-Meso.

$$\langle -w' u' \rangle = l \sqrt{2k} S_M \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial z} \quad \langle -w' v' \rangle = l \sqrt{2k} S_M \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial z}$$

$$\langle -w' \theta_v' \rangle = \alpha l \sqrt{2k} S_M \frac{\partial \langle \theta_v \rangle}{\partial z} \quad \langle -w' q_v' \rangle = \alpha l \sqrt{2k} S_M \frac{\partial \langle q_v \rangle}{\partial z}$$

$$R_k = \alpha l \sqrt{2k} S_M \frac{\partial k}{\partial z} \quad R_{2kl} = \alpha l \sqrt{2k} S_M \frac{\partial (2kl)}{\partial z}$$

$$S_M = \begin{cases} 1.96 \frac{(0.1912 - Ri_f)(0.2341 - Ri_f)}{(1 - Ri_f)(0.2231 - Ri_f)} & (Ri_f < 0.16) \\ 0.085 & (Ri_f \geq 0.16) \end{cases}$$

$$\alpha = \begin{cases} 1.318 \frac{0.2231 - Ri_f}{0.2341 - Ri_f} & (Ri_f < 0.16) \\ 1.12 & (Ri_f \geq 0.16) \end{cases}$$

$$Ri_f = \begin{cases} 0.6588 [Ri + 0.1776 - [Ri^2 - 0.3221 Ri + 0.03156]^{1/2}] & (Ri < Ri_c) \\ Ri_{fc} & (Ri \geq Ri_c) \end{cases}$$

$$Ri = -g \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial z} \left[\langle \theta \rangle \left\{ \left(\frac{\partial \langle u \rangle}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \langle v \rangle}{\partial z} \right)^2 \right\} \right] \quad Ri_c = 0.195$$

上昇で海風が徐々に発達を始め, 午後の時間帯には東京

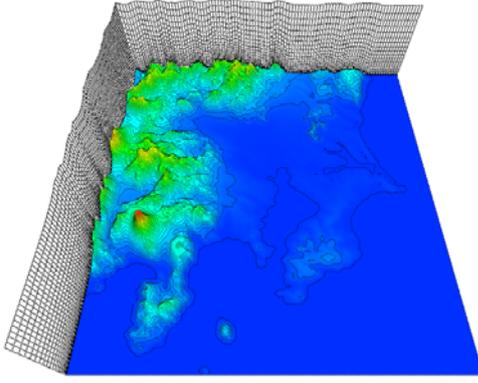


Fig. 2 関東地方を対象としたAppias-Mesoの計算格子
Appias-Meso Grid System for Kanto Region.

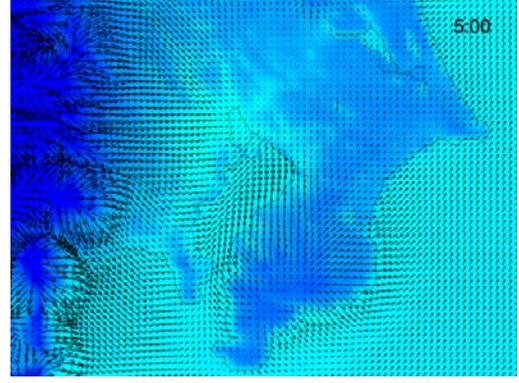


Fig. 3 関東地方の気温、風速ベクトル分布 (5時)
Temperature and Wind Velocity Vector for Kanto Region at 5:00.

湾から関東の内陸に向かう風の流れが形成された。Fig. 1a に地上5m高さ、14時の分布を示す。このとき埼玉県北部、群馬県南部にかけての領域で高温域のピークが発生するのが捉えられている。一方東京湾沿岸は、海の空気の侵入により、内陸よりも相対的に気温が低い。

2.3 Appias-M

Appias-Mで用いる基礎式をTable 4に示す。連続の式、流れ場の運動方程式、乱流エネルギー k 、 k の消散率 ε 、エネルギー式、ならびに水蒸気の各輸送方程式である。ここで p : 空気密度 ρ で正規化された圧力、 T : 気温、 c : 絶対湿度、 Q : 人工排熱量。流れ場は非圧縮性を仮定し、ブジネスク近似を用いた。また、圧力場と流れ場の連成には擬似圧縮性の解法¹⁴⁾を採用した。エネルギー式には、気温 T の鉛直方向に分布を持つ基準状態 $T_E(z)$ からの温度差、 $T' = T - T_E(z)$ を用いる。

乱流拡散フラックスには、Table 5に示すMellor and Yamadaレベル2.5のクロージャーモデル¹⁵⁾を改良した中西¹⁶⁾による式を用いた。Appias-Meso同様、大気安定度に応じて鉛直方向のフラックスを補正する目的で、補正係数 S_M 、 S_H を速度シエア G_M ならびに温度勾配 G_H の関数で与えて、各フラックスに乗じている。

Appias-Mesoでは建物による摩擦は粗度長さで表現されていたが、Appias-Mでは都市キャノピーモデルを用いて、高さ方向の建物分布を考慮する。ここでは榎木らのモデルを採用した¹⁷⁾。Table 6に示すように格子内に占める建物の割合 λ (<1.0)を指標とし、流れ場の抗力 F_i 、ならび k や ε の輸送方程式中の生成項 F_k および F_ε を求める。ただし平均代表長さ \bar{D} は、格子内建物の総体積 $\lambda\Delta x\Delta y\Delta z$ と流体に接する総面積 $4\Delta z\sqrt{\lambda\Delta x\Delta y}$ の比にモデル定数 C_S を掛けた値とした。

基礎式を直交等間隔格子を用いた有限体積 (FAVOR) 法により離散化する。空間微分は二次精度中心差分、対流項は三次精度の風上差分、時間微分に一次精度陰解法をそれぞれ用いる。体積占有率ならびに要素界面の開口率の計算では地形のみを考慮し、建物の影響は上記のキャノピーモデルでのみ評価する。

Table 4 Appias-Mの基礎式
Basic Equations for Appias-M.

$\frac{\partial \langle p \rangle}{\partial \tau} + \beta \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} = 0$	$x_i = x, y, z$	$u_i = u, v, w$
$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial \tau} + \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle}{\partial x_j} = -\frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial R_{uij}}{\partial x_j} + G_T - F_i$		
$\frac{\partial k}{\partial \tau} + \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_j \rangle k}{\partial x_j} = \frac{\partial R_{kj}}{\partial x_j} + G_{kk} + G_{kT} - \varepsilon + F_k$		
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_j \rangle \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial R_{\varepsilon j}}{\partial x_j} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_{kk} + G_{kT}) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + F_\varepsilon$		
$\frac{\partial \langle T' \rangle}{\partial \tau} + \frac{\partial \langle T' \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_j \rangle \langle T' \rangle}{\partial x_j} = \frac{\partial R_{(T')j}}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle w \rangle T_E(z)}{\partial z} + \frac{\langle w \rangle g}{C_p} + \frac{Q}{\rho C_p}$		
$\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial \tau} + \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_j \rangle \langle c \rangle}{\partial x_j} = \frac{\partial R_{(c)j}}{\partial x_j}$		
$G_T = -g \frac{\langle T' \rangle}{T_E(z)} \delta_{i3}$	$G_{kk} = R_{uij} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j}$	
$G_{kT} = \max \left[\frac{g}{T_E(z)} \frac{v_t}{\sigma_{(T')}} S_H \left(\frac{\partial \langle T' \rangle}{\partial z} + \frac{\partial T_E(z)}{\partial z} - \frac{g}{C_p} \right), 0 \right]$		
$v_t = \sigma_\mu k^2 / \varepsilon$	$\sigma_\mu = 0.09$	$\sigma_k = 1.0$
$C_{1\varepsilon} = 1.44$	$C_{2\varepsilon} = 1.92$	$\sigma_\varepsilon = 1.3$
		$\sigma_{(T')} = \sigma_{(c)} = 1.0$

Table 5 Appias-MとAppias-Eの乱流拡散フラックス
Turbulence Fluxes for Appias-M and Appias-E.

$R_{uij} = v_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) (i, j \neq 3)$	
$R_{ui3} = v_t \left(\frac{\partial \langle w \rangle}{\partial x_i} + S_M \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial z} \right)$	
$R_{\phi i} = \frac{v_t}{\sigma_\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} (i \neq 3)$	$R_{\phi 3} = \frac{v_t}{\sigma_\phi} S_H \frac{\partial \phi}{\partial z}$
$S_M = 1.852(0.7 - 14.8G_H)D_S$	
$S_H = 1.852(0.67 + 2.28G_M - 1.64G_H)D_S$	
$D_S = (1 + 8.35G_M - 31.72G_H - 205.16G_HG_M + 47.01G_H^2)^{-1}$	
$G_M = 0.0772 \frac{v_t}{\varepsilon} \left\{ \left(\frac{\partial \langle u \rangle}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \langle v \rangle}{\partial z} \right)^2 \right\}$	
$G_H = -0.0772 \frac{v_t}{\varepsilon} \frac{g}{T_E(z)} \frac{\partial \langle T' \rangle}{\partial z}$	



(a) Appias-M計算領域内の建物形状
Building Shapes within Appias-M's Domain.



(b) キヤノピーモデル化された建物イメージ
Imaginary Shapes Obtained by Urban Canopy Model.

Fig. 4 Appias-Mで用いる都市キャノピーモデル
Shape of Buildings for Appias-M.

粗度長さを除く地表面境界条件, 人工排熱量の分布, 初期値, 流入流出ならびに上空境界条件は, 全て Appias-Mesoの結果もしくは境界条件をそのまま用いる。この時, Appias-MesoのUTM (ユニバーサル横メルカトル) 地図投影から, Appias-Mで利用する地図データの平面直交座標系への変換を行う。

東京都心南部を対象として, 東西10km×南北10km×高さ5km, 水平方向の格子解像度100m, 鉛直方向の格子解像度5m~500mで解析を行なった。Fig. 4に計算領域内の建物モデル図を示す。建物の形状と分布はGISデータ (AREA II市街図¹⁸⁾) より再現した。Fig. 4aはGISデータから抽出したそのままの建物形状, Fig. 4bはキャノピーモデルによる建物形状のイメージである。このようにキャノピーモデルでは個々の建物形状のかわりに, 計算格子単位で, 建物の占有率が利用されることとなる。

Fig. 1bに地上7.5m高さ, 14時の気温分布を示す。地形は50mメッシュ標高¹²⁾, 初期値には1日24時刻の Appias-Mesoの解析結果を用い, 各時刻毎に $\Delta t=1$ 秒で非定常解析を行なった。東京湾上空と内陸部では約2度気温差がある。また, 主要幹線道路沿いなど高層建物が密な個所で気温が高く, 都市キャノピーの働きにより都市内部の気温分布性状が表現されている。

2.4 Appias-E

Appias-Eで用いる基礎式のうちAppias-Mと異なる部分のみをTable 7に示す。ここで, T_{ref} : 代表気温, Q_T : 人工排熱量, S_C : ミストなどの水蒸気発生量である。エネルギー式には気温 T を用いる。乱流拡散フラックスの扱いはTable 5に示したAppias-Mの式と同じである。また建物の表面熱伝達率 α_T は最寄りの格子点におけるスカラ速度 U からユルゲスの式を用いて求める。また水蒸気伝達率 α_c は, 表面熱伝達率に壁面の濡れ率 $\beta_{wall} (<1)$ とレイス数 Le の逆数を乗じて求める。

Appias-Eでは個々の建物形状を直交等間隔格子を用いたFAVOR法で再現する。また, 複数の直交格子を重ね合わせ, 計算領域全体と計画建物近傍で異なる格子解像度

Table 6 都市キャノピーモデル
Urban Canopy Model for Appias-M.

$$F_i = a C_{fi} u_i \sqrt{u_j^2} \quad F_k = u_i F_i - \beta_d a C_{fi} k \sqrt{u_j^2}$$

$$F_\varepsilon = C_{pe1} \frac{\varepsilon}{k} u_i F_i - C_{pe2} \beta_d a C_{fi} \varepsilon \sqrt{u_j^2}$$

$$C_{fi} = \max \left\{ \frac{2C}{(1-\lambda)^2 C_S}, 3.0 \right\} \quad a = \frac{\lambda C_S}{(1-\lambda) D} \quad \bar{D} = C_S \sqrt{\lambda \Delta x \Delta y} / 4$$

$$C = 1.225 \quad C_S = 6.0$$

$$\beta_d = \min \{ C_{m1} \exp(-C_{m2} \lambda), 4.0 \}$$

$$C_{m1} = 68.0 \quad C_{m2} = 9.1 \quad C_{pe1} = 1.5 \quad C_{pe2} = 0.2$$

Table 7 Appias-Eの基礎式 (Appias-Mと異なる箇所)
Basic Equations for Appias-E (Differences from Appias-M).

$$\frac{\partial \langle T \rangle}{\partial \tau} + \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_j \rangle \langle T \rangle}{\partial x_j} = \frac{\partial R_{(T)j}}{\partial x_j} + \frac{Q_T}{\rho_0 C_p} + \frac{F_T}{\rho_0 C_p}$$

$$\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial \tau} + \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_j \rangle \langle c \rangle}{\partial x_j} = \frac{\partial R_{(c)j}}{\partial x_j} + \frac{S_C}{\rho_0} + \frac{F_C}{\rho_0}$$

$$G_T = -g \frac{\langle T \rangle - T_{ref}}{T_{ref}} \delta_{i3} \quad G_{kT} = \max \left[\frac{g}{T_{ref}} \frac{v_i}{\sigma_{(T)}} S_H \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial z}, 0 \right]$$

$$\alpha_T = \begin{cases} 5.8 + 3.9U & (U \leq 5\text{m/s}) \\ 7.1 * U^{0.78} & (U > 5\text{m/s}) \end{cases}$$

$$\alpha_c = \beta_{wall} \frac{\alpha_T}{Le Cp} \quad (Le = 0.83)$$

Table 8 樹木キャノピーモデル
Tree Canopy Model for Appias-E.

$$F_i = a C_{fi} u_i \sqrt{u_j^2} \quad F_k = u_i F_i \quad F_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{k} C_{pe} F_k$$

$$C_{fi} = 0.5 \quad C_{pe} = 2.0$$

$$F_T = -q_{evp} F_C \quad F_C = a \alpha_c leaf (c_{leaf} - c) \quad q_{evp} = 2.5 \times 10^6 [\text{J/kg}]$$

$$c_{leaf} = c_{saturation}(T_{leaf}) \quad T_{leaf} = T - \frac{\alpha_c leaf}{2 \alpha \theta leaf} q_{evp} (c_{leaf} - c)$$

$$\alpha_T leaf = 6.79 + 5.99 \sqrt{u_i^2}$$

$$\alpha_c leaf = \min \left[\frac{\beta \alpha_T leaf}{0.622 C_p}, 0.06 \beta \rho \sqrt{u_i^2} \right] \quad \beta = \left(75 \sqrt{u_i^2} + 1 \right)^{-1}$$

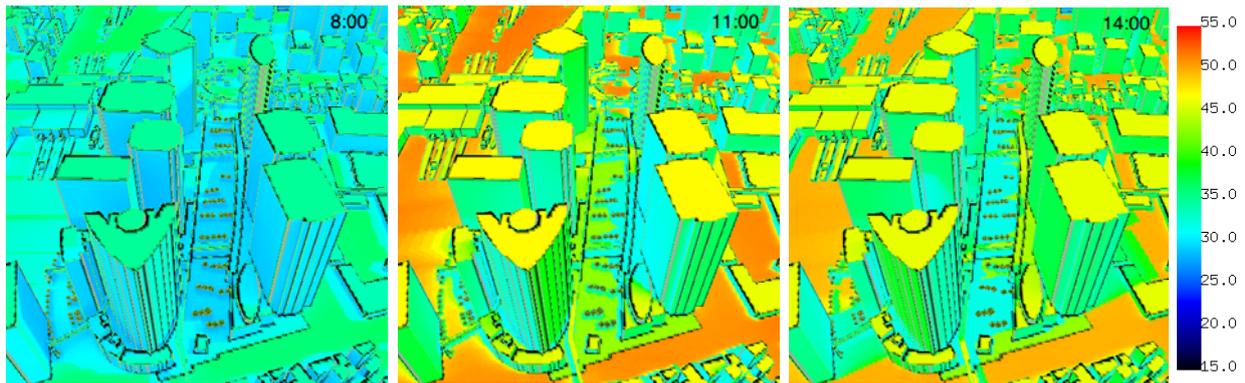


Fig. 5 品川地区の表面温度分布[°C] 左：8時，中：11時，右：14時
Surface Temperature Distributions in Shinagawa Area at 8:00, 11:00, 14:00.

のもとで計算が出来るよう重合格子法を採用している。

樹木は、Table 8に示す樹木キャノピーモデルで再現する。このうち空力的な効果 F_i , F_k , F_e には加藤ら¹⁹⁾によるモデルを用いる。ただし a は葉面積密度 [m^2/m^3] で、今回は1.5とおいた。熱的な効果のうち、樹冠内部の放射は無視する（ただし樹冠から周辺地表面に透過する放射はサーモレンダー上で扱う）。この場合、葉表面では対流熱伝達量と蒸発潜熱、対流水蒸気移動と気孔からの蒸散量がバランスすることから、繰り返し計算により、表面温度 T_{leaf} と表面湿度 c_{leaf} （飽和状態 $= c_{saturation}$ ）を求める。葉表面の熱伝達率 $\alpha_{T leaf}$ 、水蒸気伝達係数 $\alpha_{c leaf}$ 、蒸発効率 β は坂本ら²⁰⁾に従った。 q_{evp} は蒸発潜熱。ただし気孔コンダクタンスは一定とおき、昼夜に関係なく蒸散するものとした。

品川駅周辺を中心として、東西1.3km×南北1.4km×高さ700m、水平方向の格子解像度10m、鉛直方向の格子解像度2m～100mで解析を行なった。Fig. 1cに地上3m高さ、14時の気温・風速ベクトル分布を示す。またFig. 5には、8時、11時、14時の各時刻における地表面ならびに建物表面温度分布を示す。建物形状はAREA II市街図¹⁸⁾より再現した。流入気流条件は、Appias-M計算結果から領域内上空のポイント一箇所て値を抽出し、気温と風向は鉛直方向に一様、風速は建築学会指針²¹⁾の粗度区分IIIに相当するものとして与えた。

Fig. 1cの気温・風速ベクトルによると、品川駅東口の再開発地区では、緑地内で周囲よりも気温が低い。また図の東端にある運河に沿って、海からの冷気流が侵入しているのが見える。逆にJR線路上では周辺街区からの気流の吹き寄せによって、気温が上昇している。

このようにAppias-Eでは街区内にある建物周辺の風向・風速、気温、湿度の詳細な分布が予測可能である。

3. 解析事例

3.1 樹木による冷却効果の予測

樹木キャノピーモデルの検証を目的として、樹木によ

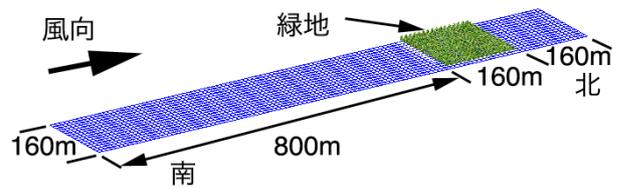
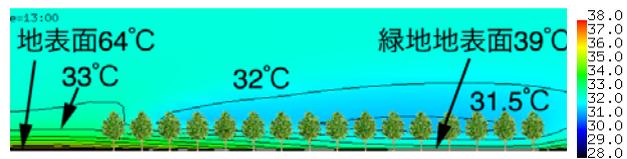
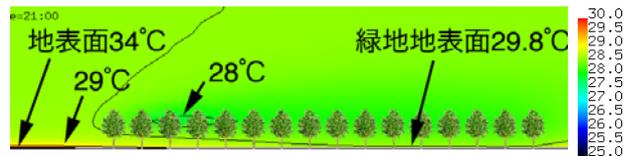


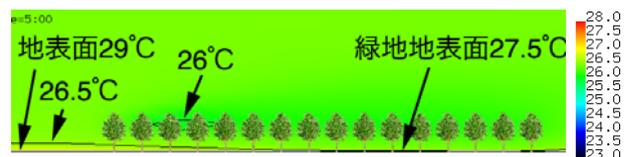
Fig. 6 樹木キャノピー解析モデル図
Model for Tree Canopy Computation.



(a) 13時 流入気流：32.3°C, 55%, 1.2m/s,
直達日射881.6W/m², 散乱日射98.9W/m²
13:00 Inflow: 32.3°C, 55%, 1.2m/s, Solar Radiation:
881.6W/m² (direct), 98.9W/m² (diffuse).



(b) 21時 流入気流：28.5°C, 79%, 0.9m/s,
直達日射0W/m², 散乱日射0W/m²
21:00 Inflow: 28.5°C, 79%, 0.9m/s, Solar Radiation: 0W/m²
(direct), 0W/m²(diffuse).



(c) 5時 流入気流：26.4°C, 85%, 0.8m/s,
直達日射0W/m², 散乱日射11.6W/m²
5:00 Inflow: 26.4°C, 85%, 0.8m/s, Solar Radiation: 0W/m²
(direct), 11.6W/m²(diffuse).

Fig. 7 樹木キャノピー内の温度分布[°C]
Temperature Distributions within Tree Canopy.

る冷却効果の予測を行った²²⁾。Fig. 6に解析領域を示す。160m四方の緑地に樹高15m、葉張り10mの高木を10m間隔で256本植えた状態を想定した。樹冠は地上5mから15mの間に存在する。緑地南側800mは平坦地で、粗度区分IIIの流入気流分布のもと気温の鉛直分布を発達させる。地表面は緑地内外共にアスファルト舗装面とした。領域の高さは500mである。計算格子は水平方向に解像度10mの直交等間隔、鉛直方向に最小格子幅1mの不等間隔格子を用い、格子点数は $16 \times 112 \times 35 = 62,720$ 点。風向は南で固定し、それ以外の要素は東京の典型的な夏季晴天時の気象データを用いた。

緑地帯を含む鉛直断面内温度分布のうち、13時、21時、5時の分布をFig. 7に示す。また、緑地風上端部から北側120mの緑地内と、南側60mの緑地外のそれぞれの場所での、地上1.5mと、樹冠内部に相当する高さ11.5mでの気温と相対湿度の日変化をFig. 8に示す。

日中は樹冠の日射遮蔽により、地表面温度で25度 (Fig. 7a)、地上1.5m気温で約4度 (Fig. 8) の温度差が緑地内外で生じる。また樹冠高さでは、緑地内は蒸散効果によって1.4度の気温低下が生じる。日射のない夜間および早朝は、高さに関わらず緑地内外間の温度差は高々0.4度程度である (Fig. 8)。夜間や早朝では蒸散による冷却効果が日中ほど高くないのは、気温の低下に伴い相対湿度が上昇し、蒸散量が低下するためである。

樹冠内部の放射を扱った坂本ら²⁰⁾の解析では、樹木による冷却効果は、昼間で1度 (ただし樹冠頂部は日射による加熱が生じる)、夜間で0.5度 (放射冷却主体) である。本解析では、樹冠内の放射伝熱と気孔コンダクタンスの日変化を無視しているため、夜間の蒸散が放射冷却に置き換わり、結果として坂本らと同等の冷却効果となった。

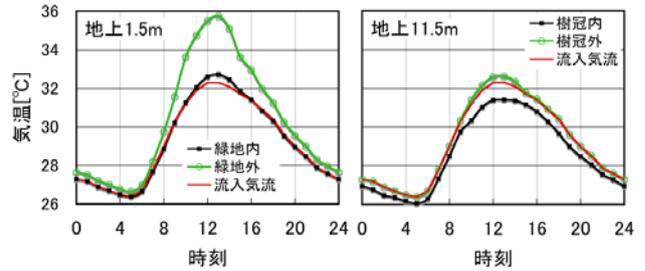
3.2 大阪市中之島周辺地区の全域湿潤化

次に、大阪市中心部にある中之島周辺の気温を予測した事例²³⁾を示す。ここでは保水性舗装と屋上緑化を適用して解析領域全体を湿潤化した場合、現状に対して気温がどの程度下がるかについて予測を行なった。解析領域の範囲は、中之島を中心とした東西1.88km、南北1.58km、高さ700mの領域である。解析対象領域内の建物モデル図をFig. 9に示す。

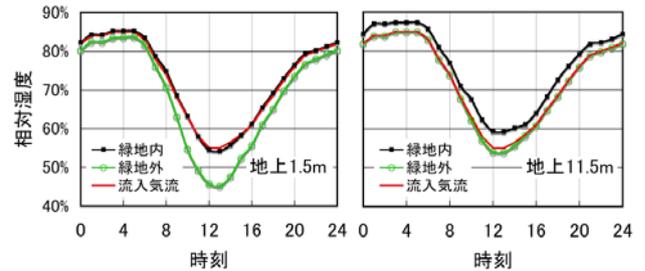
現況では建物は全て商業施設と見なし、屋上は断熱有りの陸屋根で濃い色のモルタル仕上げ、壁面は断熱有りで淡い色のタイル仕上げとした。また地表面は全てアスファルト舗装とした。一方湿潤化後は、建物の屋上を緑化屋上に変更する。地表面に関してはインターロッキングブロックを用いた保水性舗装を想定した。

計算格子は水平方向に解像度20mの直交等間隔、鉛直方向に最小格子幅1mの不等間隔格子を用い、格子点数は $94 \times 79 \times 37 = 274,762$ 点。大阪の典型的な夏季晴天時の気象データを用いて解析を行なった。

Fig. 10a, bの表面温度分布を比較すると、道路表面温度は現況の60℃から保水性舗装後に38℃となり、約22度低



(a) 気温の日変化
Daily Changes of Temperature.



(a) 相対湿度の日変化
Daily Changes of Relative Humidity.

Fig. 8 日変化の計算結果
Computed Daily Changes at Different Heights.



Fig. 9 大阪市中之島周辺地区を対象としたモデル図
Computational Model for Nakanoshima Area.

下している。同様に屋根表面温度は屋上緑化によって48℃から40℃へ約8度低下しているのがわかる。

現況の地上1.5mの気温分布 (Fig. 10c) によると、堂島川や土佐堀川上では32.5℃であり、中之島内の気温33.5℃よりも約1度気温が低い領域が形成されている、また西寄りの風向きのため、東西方向の通りよりも、風通しの悪い南北方向の通り (例えば御堂筋) の方が、気温が高くなる傾向にある。一方湿潤化後のFig. 10dでは、34℃付近の領域がほぼ消滅する。また御堂筋上の気温を湿潤化前後で比較すると、現況の33℃~34℃であった気温が、32℃~33℃となり、約1度程度の気温低下が得られている。

このように広範囲に湿潤化舗装や屋上緑化を行なっても、気温低下は高々1度程度であるという結果が得られた。

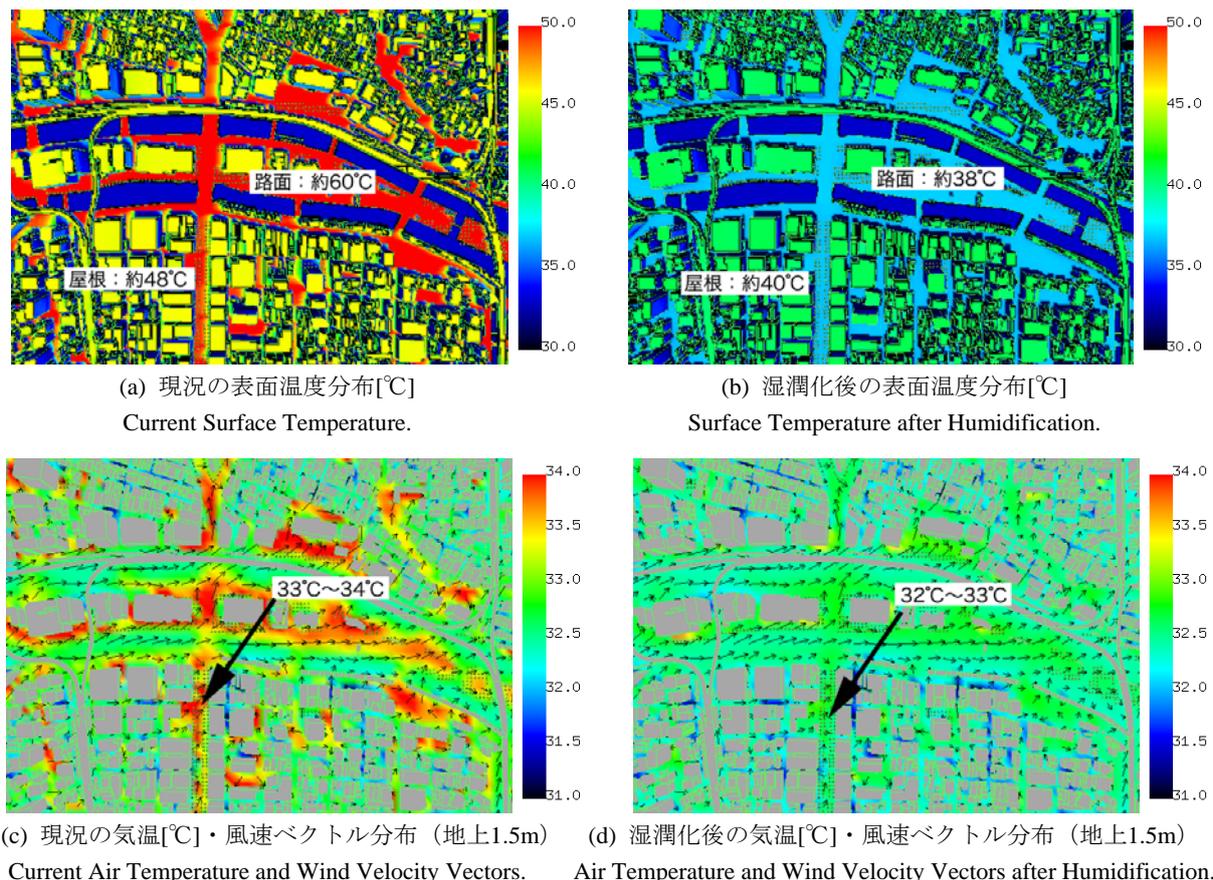


Fig. 10 大阪市中中之島周辺地区の全域湿潤化による影響予測 (8月1日, 12時)

Effect of Entire Humidification of Blocks by Green-Roof and Wet Pavement on Temperature in Nakanoshima Area.

3.3 新築計画における緩和対策技術の効果予測

最後に、ある計画建物において採用予定の、各種ヒートアイランド緩和対策技術の効果予測を行なった例を示す。対象となる建物は10階建て、軒高さ約42mの事務所ビルで、敷地の西側に自走式の立体駐車場が計画されている。計画地は近畿地方の市街地である。

Fig. 11に解析対象となる建物形状と、採用予定の緩和対策技術を示す。採用される緩和対策技術は、外構の湿潤舗装と緑地、計画建物屋上の一部を屋上緑化、ならびに立体駐車場の壁面緑化である。計画建物の屋上は断熱有りで濃い色のコンクリート抑え、壁断熱有りで濃い色の石張り、ガラスは二重ガラスとした。周辺建物の屋根は計画建物と同一で、壁は断熱有りで濃い色のALCパネルに設定した。地表面は全て濃い色のアスファルト舗装と仮定した。

計算領域を東西360m×南北360m×高さ700mに設定した。計算格子は水平方向に解像度5mの直交等間隔、鉛直方向に最小格子幅1mの不等間隔格子を用い、格子点数は72×72×37=191,808点。大阪の典型的な夏季晴天時の気象データを用いて解析を行なった。

Fig. 12aに表面温度分布の計算結果のうち12時の値を示す。外構をアスファルト舗装から湿潤舗装に置き換え

る事で、50°Cから33°Cへ約7度の温度低下が予想される。また、緑地化した場所では50°Cから40°Cへ約10度の温度低下が見込まれる。同様に屋上緑化は約13度、壁面緑化は3度程度の表面温度低下につながった。

Fig. 12bに、同時刻における地上1.5mの気温と風速ベクトルの分布を示す。計画建物の東側の湿潤舗装と緑地が広く取られている領域では、33.5°Cから33°Cに約0.5度の気温低下が認められる。効果の及ぶ範囲はほぼ敷地内に限定されるものの、緩和対策技術が有効に働いていることが予測された。一方で、建物の東面から離れた所では、緩和対策後の方が33.5°C以上の領域がやや広がっている。これは強風対策のための防風植栽によって、建物東角からの剥離流の風速が抑えられたためである。

この様に、気温の低下量や気温が低下する範囲を具体的に示す事で、ヒートアイランド緩和対策の有効性を訴える事が出来る。

4. まとめ

ヒートアイランド緩和対策技術の効果確認と、市街地の屋外熱環境の予測を目的として、数値都市気候モデル「Appias (アピィアス)」の開発を行なった。同モデルの概要を以下に示す。

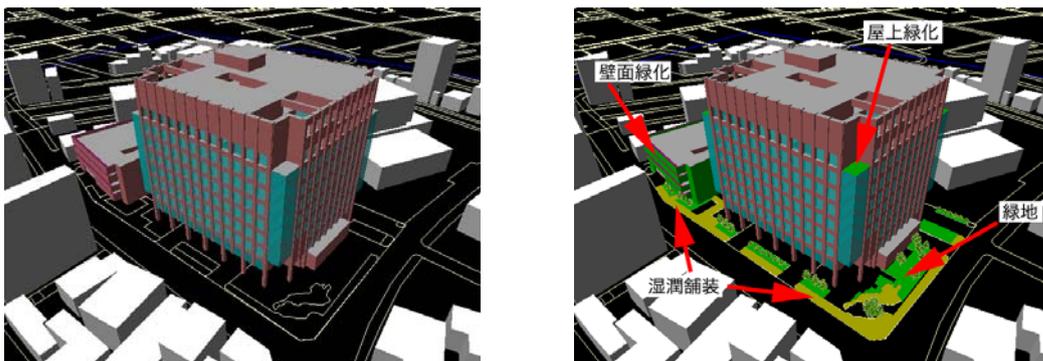
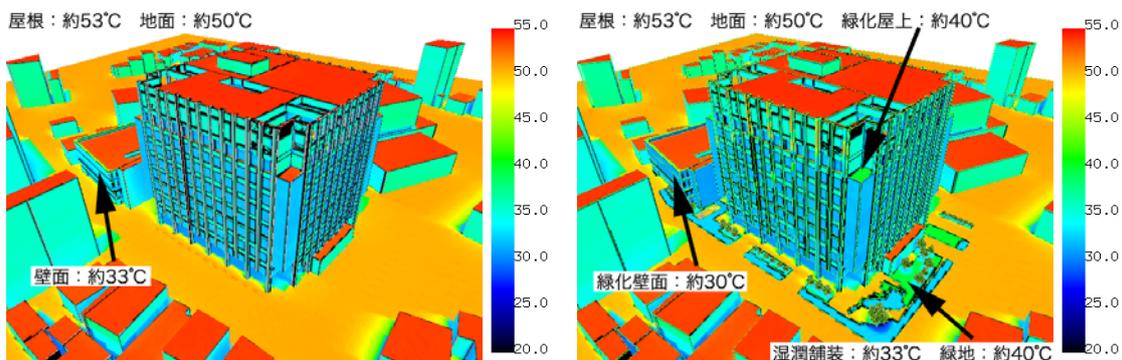


Fig. 11 計画建物のモデル図（南東上空からの鳥瞰図） 左：緩和対策技術なし，右：緩和対策技術有り
Computational Models: without (left) and with (right) Mitigation Measures.

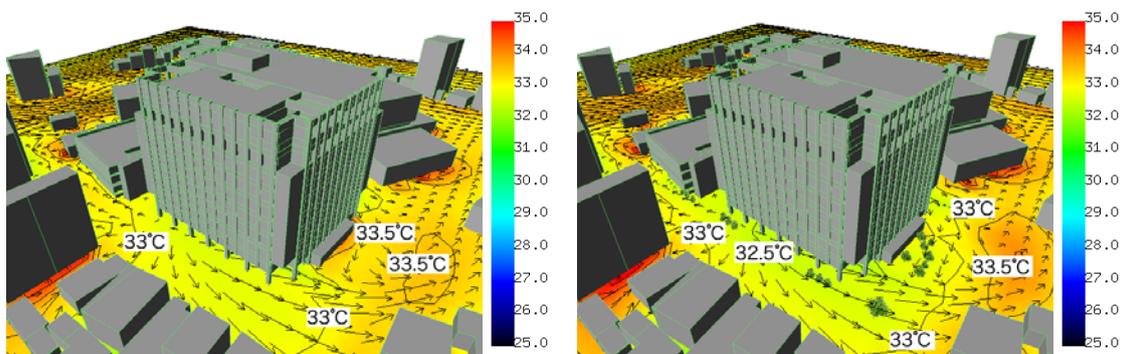


(a) 表面温度分布[°C] 左：緩和対策技術なし，右：緩和対策技術有り

流入気温：32.4°C，湿度：54%，風向：SW，風速：1.5m/s，直達日射535W/m²，散乱日射142W/m²

Surface Temperature Distributions: without (left) and with (right) Mitigation Measures.

Inflow: 32.4°C, 54%, 1.5m/s(SW), Solar Radiation: 535W/m² (direct), 142W/m²(diffuse).



(b) 気温[°C]，風速ベクトル分布（地上1.5m） 左：緩和対策技術なし，右：緩和対策技術有り

Air Temperature and Wind Velocity Vector Distributions: without (Left) and with (Right) Mitigation Measures

Fig. 12 計画建物における各種ヒートアイランド緩和対策技術の効果予測

Assessment of Heat Island Mitigation Measures Applied for A Building Plan

- 1) Appiasは、Appias-Meso, Appias-M, Appias-Eの3つの解析モデルで構成されていて、対象となる現象のスケールに応じて選択される。また、全体を接続（1方向ネスティング）することで、広域から街区レベルの現象まで同時に解析する事が出来る。
- 2) Appias-Mesoは、海陸風など都市気候に影響を与える中規模の気象現象を対象とし、非圧縮・静水圧平衡

を仮定した気象モデルで構成されている。地表面境界は、土地利用区分に基づいて取り扱う。

- 3) Appias-Miは、都市域内の気温分布、風の道の評価などを対象とし、非圧縮・非静水圧流れ場を仮定した工学モデルで構成されている。建物による空力的な効果を都市キャノピーモデルにより再現する。
- 4) Appias-Eは、街区内の分布、各種ヒートアイランド緩和対策技術の効果確認を目的とした工学モデルで

ある。個々の建物形状はFAVOR法により再現される。表面温度分布は、サーモレンダーによる計算結果を境界条件として取込む。また樹木による空力的な効果と、葉からの蒸散による冷却効果を扱う。

またAppiasを用いた解析事例により以下の知見を得た。

- 5) 樹木による冷却効果の確認を目的とした解析を行ない、日中は樹冠の日射遮蔽により約4度、夜間および早朝は蒸散効果により約0.4度気温が低下する事が示された。
- 6) 大阪中之島周辺を対象とし、全域に湿潤舗装ならびに屋上緑化を施した場合の解析を行ない、全体で約1度の気温低下が得られる事が予測された。
- 7) 計画中の建物に対して、各種ヒートアイランド緩和対策技術を施した場合の効果予測を目的とした解析では、昼間の表面温度が約7度～10度、気温が約0.5度低下する事が示された。このように効果を具体的に示す事で、緩和対策の有効性を訴える事が出来る。

このように数値都市気候モデル「Appias (アッピラス)」によって、気象スケールから、ヒートアイランド緩和対策技術の効果確認に至るまで、複数の規模を対象とした屋外熱環境の予測が可能である。また、近年頻発している突風災害に対して、Appias-Mを用いて東京都心で発生したダウンバーストによる強風域の予測²⁴⁾も行なっている。

参考文献

- 1) 星秋夫：暑熱環境と熱中症発生リスク，第38回熱環境シンポジウム「暑熱環境と人間・社会」，pp. 19-22, (2008.7)
- 2) 気象庁：ヒートアイランド監視報告（平成19年冬・夏-関東・近畿地方），(2008.5)
- 3) 日本建築学会：ヒートアイランドと建築・都市-対策のビジョンと課題，丸善，p. 30, (2007.8)
- 4) 都心のヒートアイランド-海風はばむビル群が原因？，東京新聞，(2004.6.19)
- 5) 東京都都市整備局：品川駅・田町駅まちづくりガイドライン，(2007.9)
- 6) 三浦昌生他：風通しを考慮した主要都市のグロス建蔽率の基準値，日本建築学会第15回空気シンポジウム「都市空間の換気・通風と風の道」，pp. 55-62, (2006.9)
- 7) 堀越哲美，橋本剛：風の通り道としての河川空間の機能，日本建築学会第15回空気シンポジウム「都市空間の換気・通風と風の道」，pp. 43-48, (2006.9)
- 8) （財）建築環境・省エネルギー機構：<http://www.ibec.or.jp/CASBEE>
- 9) （株）エーアンドエー：A&A環境設計（熱）サーモ

レンダー 3, (2008.6)

- 10) Kao, C. J. and Yamada. T : Use of the CAPTEX Data for Evaluations of a Long-range Transport Numerical Model with a Four-dimensional Data Assimilation Technique, Mon. Weather Rev., Vol. 116, pp. 293-306, (1988)
- 11) Yamada. T : Simulations of Nocturnal Drainage Flows by a q^2l Turbulence Closure Model., J. Atmos. Sci., Vol. 40, pp. 91-106, (1983)
- 12) 国土地理院：数値地図50mメッシュ（標高），(2001)
- 13) 国土計画局：国土数値情報土地利用3次メッシュデータ，(2001)
- 14) 片岡浩人，水野稔：擬似圧縮性法による物体周りの剥離流れの数値解析，日本建築学会計画系論文集，No. 504, pp. 63-70, (1998.2)
- 15) Mellor G. L. and Yamada T. : Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, Rev. Geophys. and Space Phys. Vol. 20, No. 4, pp. 851-875, (1982)
- 16) Nakanishi, M. : Improvement of the Mellor-Yamada turbulence closure model based on Large-Eddy simulation data, Boundary Layer Meteor. Vol. 99, pp. 349-378, (2001)
- 17) 榎木康太，山口敦，石原猛：新しい市街地気流解析モデルの提案とその検証，風工学シンポジウム論文集，pp. 85-90, (2008.12)
- 18) 三井造船システム技研：AREA II市街図，(2008)
- 19) 加藤敦子，持田灯，吉野博，村上周三：Canopyモデルを組み込んだk-εモデルによる単独樹木周辺の風速分布の予測，建築学会大会梗概集 D-1, pp. 929-930, (2001.9)
- 20) 坂本雄三，小島悦史，足江靖信，今野雅：CFDを利用した樹木のクールスポット効果の数値解析，建築学会大会梗概集D-1, pp. 689-690, (2005.9)
- 21) 日本建築学会編：建築物荷重指針・同解説，丸善，(2004.9)
- 22) 片岡浩人，大塚清敏，赤川宏幸：屋外熱環境評価のための数値予測モデルの開発-樹木による冷却効果のモデル化-，日本建築学会大会学術講演会梗概集D-1, pp. 927-928, (2008.9)
- 23) 赤川宏幸：建築周りのヒートアイランド対策6-ヒートアイランド対策の評価-，まちなみ，社団法人大阪府建築士事務所協会，Vol. 32, No. 36, pp. 20-21, (2008.11)
- 24) 片岡浩人，大塚清敏：キャノピーモデルを用いた市街地ダウンバースト気流の数値シミュレーション，風工学会誌，Vol. 34, No. 2, pp. 151-152, (2009.4)

本論文中で使用した地図データの許諾番号：

Z09LD第111号、Z09LD第112号（ゼンリン）