

街区構造と電力需要の違いが 都市熱環境に及ぼす影響 大阪市街地を対象にした解析

INFLUENCE OF DIFFERENCES IN URBAN STRUCTURE AND ELECTRIC POWER
DEMAND ON URBAN THERMAL ENVIRONMENT IN OSAKA URBAN AREA

畔柳秀匡¹・大橋唯太²・亀卦川幸浩³
岡和孝⁴・重田祥範⁵・平野勇二郎⁶・日下博幸⁷・Fei CHEN⁸

Hidemasa KUROYANAGI, Yukitaka OHASHI, Yukihiro KIKEGAWA

Kazutaka OKA, Yoshinori SHIGETA, Yujiro HIRANO, Hiroyuki KUSAKA and Fei CHEN

¹ 学生員 岡山理科大学大学院総合情報研究科 (〒700-0005 岡山市理大町 1-1)

² 博(理) 岡山理科大学准教授 総合情報学部生物地球システム学科 (1に同じ)

³ 博(工) 明星大学准教授 理工学部環境システム学科 (〒191-8506 東京都日野市程久保 2-1-1)

⁴ 博(理) みずほ情報総研株式会社 (〒101-8443 東京都千代田区神田錦町 3-1)

⁵ 修(総合情報) 岡山大学大学院自然科学研究科 (〒700-8530 岡山市津島中 1-1)

⁶ 正会員 博(工) 名古屋大学研究員 大学院環境学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

⁷ 博(理) 筑波大学講師 計算科学研究センター (〒305-8572 つくば市天王台 1-1-1)

⁸ Ph.D., National Center for Atmospheric Research (PO Box 3000, Boulder, CO 80307-3000)

This paper presents how the micro-scale (1km-square) thermal environment is affected by the building structure and anthropogenic heat, especially, for cooling demands during summer. The office building and residential districts in Osaka City were chosen for our observations and numerical experiments. A comparison between the weekday results and holiday those suggested the anthropogenic heat by the air-conditioning operations plays an important rule for the air-temperature rise in the office district, but can be neglected that in the residential district. From the numerical experiments, the daytime sensible heat in the office and residential districts were mainly occupied by the anthropogenic heat (40% of all sensible heat fluxes) due to the air-conditioning operations and sensible heat (25% of all sensible heat fluxes) from a roof surface, respectively.

Key Words: urban district, demand for electricity, temperature observation, numerical simulation

1. はじめに

都市の気温が郊外に比べて高温化するヒートアイランド現象は、アスファルトなど人工物の被覆や、建物がつくるキャニオン構造による都市特有の放射環境などが原因で発生する。都市構造に起因する高温化の対策として、建物の屋上緑化、壁面の高反射塗装、道路面の保水性舗装などが、環境省や地方自治体によって推奨されている。これらの対策効果に関しては、これまで数値シミュレーションを用いて定量的に評価されてきている^{1) 2)}。

また、冷房使用に伴う空調室外機からの人工排熱も、夏季における気温上昇の原因として指摘されており、Ohashi et al.³⁾は、東京都心部の業務系用途街区では冷房排熱によって地上気温が約1℃上昇している可能性を、数値実験より明らかにした。また、鳴海ほか⁴⁾は、夜間の人工排熱が気温を大きく上昇させることを指摘している。さらに、都市の高温化によって増大する冷房需要は、更なる冷房排熱を招くという悪循環を生み出す。このような都市熱環境と冷房電力消費の関係については、亀卦川ほか⁵⁾や原田ほか⁶⁾など、東京23区を対象に分析された事

例が存在する．これらの既往研究の結果から，人工排熱の削減もヒートアイランド対策として有効であるが，特に冷房需要由来の排熱は建物内の人間活動が大きく関与するため，街区スケールでの実態把握が肝要とされる．

ヒートアイランド現象の要因である上述の都市構造と人工排熱は，都市規模や立地条件だけでなく，より小スケールの街区を構成する建物群の主用途によっても都市大気への影響が異なると考えられる．したがって，ヒートアイランド対策を導入する場合，上記の何が原因となって高温化が起きているかを十分把握した上で，その都市街区に適したヒートアイランド対策を施す必要がある．

このような原因追求や対策効果の定量評価に関する既往研究は，東京都心部を対象にしたものが多く，他の都市に対する事例研究は少ない．また，解析には数値モデルを用いるのが主流で，気温の実地観測から冷房排熱が街区スケールの熱環境に及ぼしている影響を検討した研究は，ほとんど見られない．

大阪では，鳴海ほか⁴⁾が数値モデルを用いて，夏季の人工排熱がヒートアイランド現象に及ぼす影響とその対策を検討している．しかし，冷房排熱の街区スケール気温に対する寄与は不明であった．また街区スケールの気温分布は，建物や自動車由来の排熱，放射環境や乱流の局所的な作用によって，同一街区内の数十m離れた地点でも熱環境が異なる恐れがある⁷⁾．したがって，街区内の実際の気温特性を把握した上で，数値モデルの再現性の検討や感度実験を行うことが重要である．

本研究の新規性としては，実在街区を対象とした気温観測と数値シミュレーションによる，以下の点が挙げられる．

- (a) 建物用途が異なる街区で計測された地上気温の差の実態を明らかにする．
- (b) (a) の気温差と電力需要（特に冷房需要）の関連性を見出す．
- (c) 都市大気に排出される各顕熱成分を比較することで，(a) の気温差が形成される要因を明らかにする．

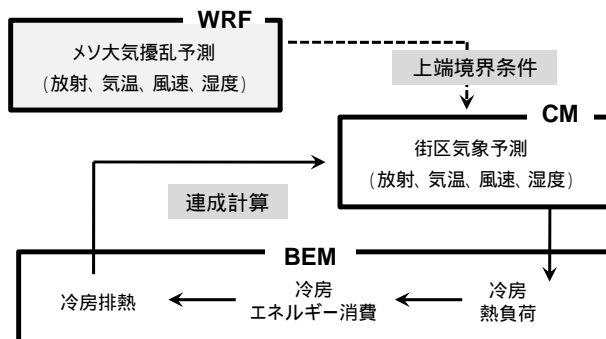


図-1 都市気象・ビルエネルギー連成モデルの計算フロー．

2. 数値モデル

本研究では水平 1km 四方範囲の街区熱環境を再現するために，メソスケール気象モデル(WRF)，都市キャノピーモデル(CM)⁹⁾，ビルエネルギーモデル(BEM)⁵⁾の連成型数値モデルを用いた．WRFでは数十km～数百kmでの広域気象場の変動を予測する．CMでは数百mの街区スケールにおける気象変動を，一方BEMでは建物への熱負荷と冷房による排熱量を予測する．モデル間の結合・計算フローを図-1に示す．

(1) メソスケール気象モデル(WRF)

WRF(Weather Research & Forecasting Model)-ARW Ver2.2はNCARなどによって開発された，完全圧縮・非静力学平衡を基礎とした流体方程式からなる数値モデルである．地表面，雲微物理，大気境界層など様々な物理過程が組み込まれている．計算領域は，大阪市を中心に3重ネスティングをおこない，各領域の水平格子間隔を9km, 3km, 1kmと次第に小さくなるよう設定した．また，初期値・境界値には，気象庁メソ客観解析値(大気)とNCEP客観解析値(土壌，海水面温度)を用いた．その他の詳細については，WRFホームページ⁸⁾に掲載されている．

(2) 都市キャノピーモデル(CM)

CMは近藤・劉(1998)⁹⁾によって開発された，鉛直一次元の拡散方程式を基礎とする多層都市キャノピーモデルである．このモデルでは，1格子内に同一の大きさを持った直方体形建物が整形配列していると仮定される．また，建物の高さは，鉛直存在割合 $P_w(z)$ (高度 z における建物の存在割合) を与えることで考慮している．風速，温度(温位)，湿度(比湿)の基礎方程式を以下に示す．

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \cdot m \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right) - c_d a u \left(\sqrt{u^2 + v^2} \right) + f(v - v_g) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \cdot m \cdot \frac{\partial v}{\partial z} \right) - c_d a v \left(\sqrt{u^2 + v^2} \right) - f(u - u_g) \quad (2)$$

$$c_p \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = c_p \rho \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \cdot m \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + Q_{Ws} + Q_{Rs} + Q_{As} + Q_{Vs} \quad (3)$$

$$l_p \frac{\partial q_v}{\partial t} = l_p \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial z} \left(K_q \cdot m \cdot \frac{\partial q_v}{\partial z} \right) + Q_{Wl} + Q_{Rl} + Q_{Al} + Q_{Vl} \quad (4)$$

式中の， $u \cdot v$ (m/s)は風速の東西成分・南北成分， $\theta(K)$ は温位， $q(kg/kg)$ は比湿， $K_m \cdot K_h$ (m²/s)は運動量・熱(水蒸気)の鉛直拡散係数， $f(s)$ はコリオリパラメータ， $c_d(-)$ は建物による抵抗係数， a (m²/m³)は建物の面積密度， m (-)は有効空気体積率， $u_g \cdot v_g$ (m/s)は地衡風の東西成分・

南北成分, c_p (J/kg · K) は空気の定圧比熱, ρ (kg/m³) は空気密度, L (J/kg · K) は蒸発潜熱をそれぞれ示す. (3) 式中の Q_s は, 建物屋上面からの顕熱輸送量(Q_R), 建物壁面からの顕熱輸送量(Q_W), 冷房室外機からの排熱熱量(Q_A), 室内換気による顕熱交換量(Q_V)の和を示す. (4) 式中の Q_L はそれらの潜熱成分を意味する. 建物の各表面からの顕熱と潜熱を計算するには, その表面における熱収支を計算する必要がある. このため, キャノピー内の仮想的な建物に対し, その壁面が正確に東西南北の 4 方位を向いているものとして, 建物の影の影響や天空率を近似的に計算して各高度の放射量を計算している.

表-1 空調シミュレーションに関わる条件設定.

	業務街区	住宅街区
冷房時間	7:00 ~ 23:00	1:00 ~ 24:00
冷房設定温度[°C]	26.0	26.0
冷房設定湿度[%]	50.0	50.0
冷房方式割合[空冷:水冷]	7 : 3	10 : 0
窓面での日射透過率[%]	0.30	0.86
外気導入力[m ³ /floor-m ² ·h]	4.0	1.0
床面積あたり在室人数[人/floor-m ²]	0.13	0.02
人体発熱量(顕熱) [kcal/人/h]	47.0	47.0
人体発熱量(潜熱) [kcal/人/h]	55.0	55.0
延床面積に占める冷房面積[%]	60.0	40.0

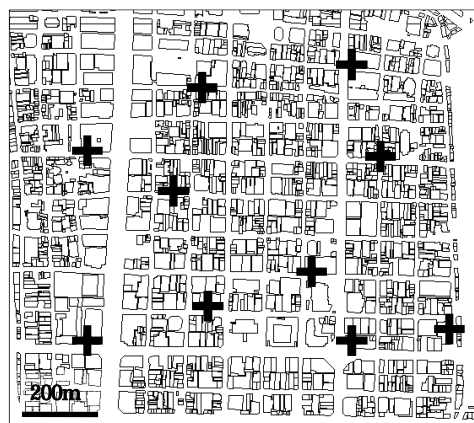


図-2 業務街区(大阪市中央区)の固定観測地点.

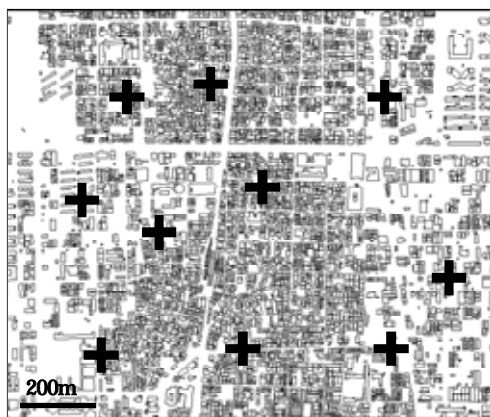


図-3 住宅街区(大阪市東住吉区)の固定観測地点.

(3) ビルエネルギーモデル(BEM)

BEM は亀卦川ほか⁵⁾によって開発された, 都市キャノピー大気と建物間の熱交換過程を予測する数値モデルである. この数値モデルでは, 建物を一つのボックスと仮定して室内の熱収支計算をおこなっている. ここでは, 窓面からの透過日射, 壁面からの貫流熱, 換気に伴う熱の流出入, 照明や OA 機器, 人体からの発熱量などを求めることによって, 建物内の熱負荷を求める. これらの熱負荷は冷房運転によって, 排熱として室外大気へ排出される(Q_A). この冷房排熱と換気顕熱が CM の (3) 式中に反映されることで, 人間活動を考慮した街区内の気温予測が可能となる. また, BEM での冷房運転・熱源機器構成など, 各種設定条件を表-1 に示す. BEM の詳細については, 亀卦川ほか⁵⁾に依る.

CM と BEM の連成計算に関する精度検証や, CM 及び BEM 内にあるパラメータの感応度実験については, Ohashi et al.³⁾によって検証されている. そこでは, 種々のパラメータ値を常識的な範囲で変動させても, 地上気温への影響は 0.1 未満であることが示されている.

3. 観測

(1) 概要

気象観測は, 太平洋高気圧に覆われて晴天が続いた, 2007 年 8 月 1 日 ~ 14 日の期間に連続的に実施した. 観測対象地域は, 業務用途建物群が主要を占める大阪市中央区(以降, 業務街区), 低層木造住宅が多く存在する大阪市東住吉区(以降, 住宅街区)の 2 街区である. 既述のように, 街区内の気温は, 建物や自動車からの人工排熱, 放射環境や乱流の変化によって, 同一街区内の数十 m 離れた場所でも熱環境が異なる恐れがある. したがって, それぞれの代表的な街区気温を捉えるため, 1km 四方の領域で多地点観測(各 10 箇所)を行った(図-2, 図-3). この多地点観測の平均値を, その街区を代表する気温と考えた. 測定には, 高精度サーミスタ温度計(おんどとり Jr; RTR-52; T&D 社製)を内蔵した自作の気温計測機器を用いた. 測定サンプリング間隔は 30 秒毎とし, 10 分平均値を用いて以後の解析を行った.

(2) 結果

業務街区, 住宅街区で観測された街区平均気温(以降, 単に気温と呼ぶ)と, 大阪管区気象台(以降, 気象台)の気温の時間変化を図-4 に示す. 台風接近時の 8 月 1 日 ~ 3 日, 電力需要が特殊な変動をするお盆期間 8 月 13 日 ~ 14 日を除く 9 日間の平均値として表した. また, 大阪中心部の代表気温として用いられることが多い気象台の観測値と比較することで, 実地観測の必要性を確認してみる. それぞれの街区で計測された気温を比較すると, 日中は住宅街区の方が業務街区よりも最大 0.7 高く(13

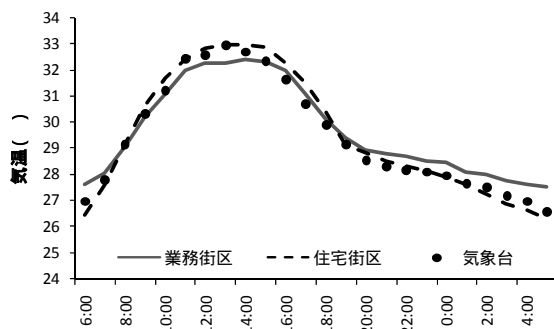


図4 街区気温の時間変化(8月4～12日のアンサンブル平均値)。

時), 夜間は業務街区の方が住宅街区よりも最大 1.2 高い(5時)。一方, 気象台の気温は, 業務街区に比べて, 日中は 0.7 高く(13時), 夜間は 1.0 低い(5時)。このように, 気象台の気温は, 業務街区よりも住宅街区の気温変化の特徴に近く, 気温に代表される街区の熱環境を把握するためには, 実際の街区内部での気温測定が必要だと言える。

4. 冷房電力需要の変化が街区気温に与える影響

(1) 電力需要量の再現性

対象街区で観測期間中, 実際に変電所で計測された電力需要量(延床面積当たり)と, モデルで計算された電力需要量を, 平日と休日に分けた時間別平均値として図-5に示す。なお, 以降で述べる平日と休日は, 平日5日間(8月6日～10日)と休日4日間(8月4日～5日, 8月11日～12日)に分けて平均を求めたものを意味する。業務街区において, 建物内の人間活動が活発な平日の電力需要量は, 休日に比べて最大で約 2.7 倍に達する。これに対して, 住宅街区の電力需要量は, 平日と休日の間でほとんど変化してない。そのような傾向は, モデル計算でもよく再現されている。モデル計算の解析から, 平日と休日の電力需要量の差のうちピーク時で約 64%が冷房運転に起因することがわかった。

(2) 街区気温の再現性

業務街区と住宅街区それぞれで計測された気温と, モデルで計算された気温の時間変化を, 図-6に示す。

両街区で計測された気温は, 夜間は住宅街区よりも業務街区の方が高く, 日中は反対に業務街区よりも住宅街区の方が高くなった。また, 日中の気温差は平日に比べて休日の方が最大 0.8 大きくなっていた。また, モデルで計算された気温も, 業務街区より住宅街区の方が日中に気温が高くなった。しかし, モデル計算では, 業務街区の夜間における気温低下の抑制があまり再現されなかった。

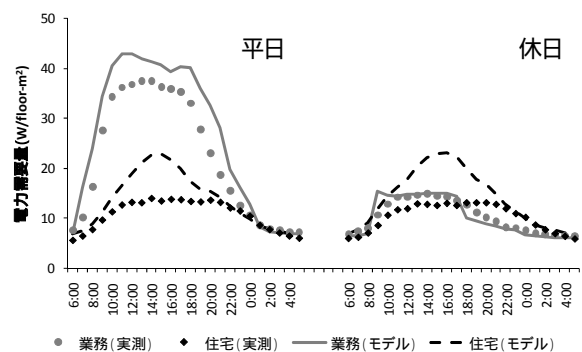


図-5 電力需要量の再現性

(平日5日間, 休日4日間のアンサンブル平均値の比較)。

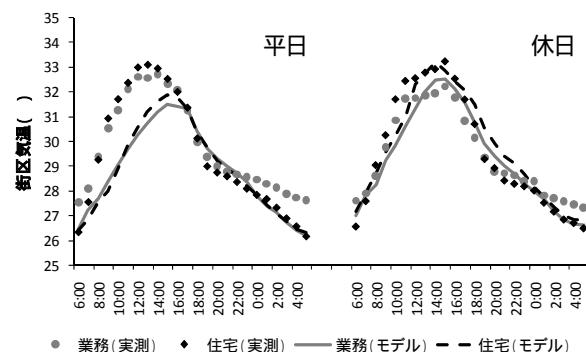


図-6 街区気温の再現性

(平日5日間, 休日4日間のアンサンブル平均値の比較)。

(3) 平日と休日それぞれの街区気温差

ここでは, 業務街区の電力需要量が平日と休日大きく変化する特徴を利用して, 電力需要量の変化が街区気温差に与える影響を定量的に評価する。本研究では, 解析期間を好天静穏日に限定しているため, 毎日に街区の地表面熱収支には大きな差異がないと考える。したがって, 「業務街区 - 住宅街区」の気温差に平日と休日の間で系統的な差が認められた場合, 主に冷房排熱量の違いが反映された結果だと推測できる。このような観点から, 実地観測と数値モデルで求められた街区気温差について平日と休日に分けて解析を行った。その結果を図-7と図-8に示す。

観測結果では, 日中に, 街区気温の差が平日よりも休日の方が著しく小さくなっている。この平日と休日での気温差の変化は, 最大で 1 にも達し, 業務街区の電力需要量が延床面積あたり約 25W/m^2 減少したことに起因する冷房排熱変化の影響を示唆する。数値モデルで計算された「業務街区 - 住宅街区」の気温差も, 観測結果と同様の傾向がみられ, 平日と休日で最大 0.8 の気温差が見られる。計算された電力から, 休日のオフィス街区の冷房電力需要量が, 平日よりも約 30W/m^2 減少したことが影響したものとする。

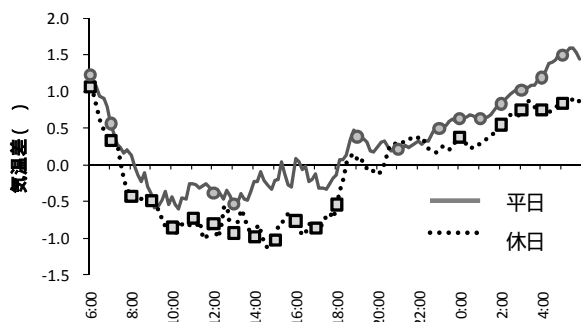


図-7 街区気温差（業務街区 - 住宅街区）の平日と休日の違い（実地観測）．印がついた時刻は，5%有意水準で有意な気温差を示す．

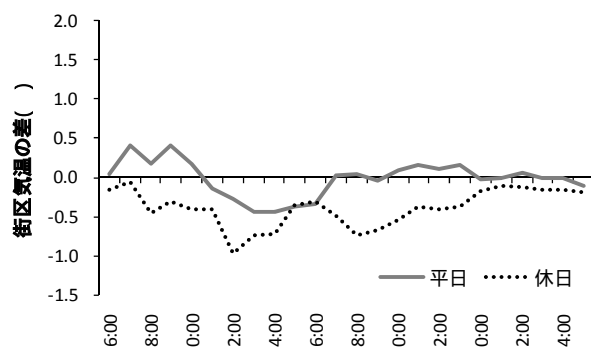


図-8 街区気温差（業務街区 - 住宅街区）の平日と休日の違い（数値計算）

5. 数値モデルによる街区熱収支の解析

CM内の気温予報式(3)式に含まれる顕熱輸送量を項別に比較することで，気温を決定するそれぞれの顕熱成分の寄与を，平日と休日に分けて検討してみる．この予報式で考慮される顕熱輸送は，街区構造に左右される道路面・建物表面（屋上面と側壁面）からの顕熱輸送，人間活動由来の顕熱輸送（以降，建物排熱）に大別できる．この解析結果を，モデル第1層（高度3m）について，図-9と図-10に示す．業務街区と住宅街区の顕熱輸送量を比較すると，業務街区の方が建物壁面と道路面からの顕熱輸送量が小さいことがわかる．特に，両街区での道路面からの顕熱輸送量の違いが大きく，最大で 120W/m^2 の違いがみられた．これは，住宅街区に比べて業務街区の建物が高く，日射が地表面まで届きにくい街区構造を有しているためだと考えられる．

業務街区（図-9）では，休日よりも平日の方が日中の顕熱輸送量は多い．休日に対する平日の顕熱増加量は，土地面積あたりで最大 180W/m^2 にも達しており，これは建物排熱の増加量とほぼ一致する．また，建物内の人間活動がある平日の午前6時から翌日午前0時までの建物排熱量は，全顕熱輸送量の40%以上を占めており，建物排熱が都市熱環境に及ぼしている影響が決して無視できないことを意味する．屋上面からの顕熱輸送量は，日中の顕熱輸送量が最も増加する時間帯の約40%（ 150W/m^2 ）を占めている．また，地表面付近での建物側壁面からの顕熱輸送は，日中はほとんど確認できず，夜間には全顕熱輸送量のうち約20%を占めていた．道路面からの顕熱輸送量は，既述のように一日を通して小さい．以上より，大阪市の業務街区を対象にヒートアイランド対策を導入する場合，日中は建物屋上面への対策が効果的であると推測される．また，多くの時間帯で建物排熱は全顕熱輸送量のうち40%以上を占めたため，建物排熱の削減も有効であると考えられる．

住宅街区（図-10）は，平日と休日で全顕熱輸送量がほとんど変化しないことがわかる．これは，住宅街区にお

ける建物排熱量が他の顕熱輸送に比べてかなり小さく，平日と休日の間でほとんど変わらないためである．日中は，建物屋上面からの顕熱輸送が最も支配的であり，ほとんどの時間帯で全顕熱輸送量の25%以上を占める．これは，建物が低層であるため，地表面に近い建物屋上面からの顕熱輸送の気温に対する影響が大きい．業務街区で他の顕熱輸送に比べて小さかった道路面からの顕熱輸送量が，住宅街区では多くなっている．これも，既述のように，住宅街区が業務街区に比べて日向の面積が大きいことに関係する．以上より，住宅街区では道路面や建物屋上面への対策が効果的であり，特に道路面への対策効果が期待できる．

6. おわりに

本研究では，建物用途（電力需要）や街区構造の違いが都市熱環境に及ぼす影響を定量的に明らかにするため，大阪市内の業務系ビル街区と低層住宅街区を対象に熱環境・電力需要解析を行った．実地観測と数値シミュレーションから得られた結果を，以下にまとめる．

(a) 業務街区内の平均気温は，住宅街区に比べて，夜間で最大1.2℃高く，日中では反対に最大で0.7℃低かった．また，業務街区と同じ建物用途街区内に存在する気象台の気温は，業務街区内で実際に計測した気温と乖離しており，街区気温が局所環境によって形成されているため，実地観測の重要性が示された．

(b) 実地観測によって得られた街区気温の差を平日と休日に分けて比較することで，建物排熱が街区気温に与えている影響を確認することができた．これは電力需要量 25W/m^2 （延床面積あたり）の変化が，1℃の外気温変化を引き起こしていることを示唆した結果であった．

(c) 街区構造や電力需要・建物排熱を考慮できる数値モデルを用いて，都市熱環境解析を検討した．実地観測で示された，各街区の電力需要量と気温の平日・休日間の変化傾向が，数値シミュレーションによっても再現された．即ち，建物内人間活動と都市大気の相互作用による

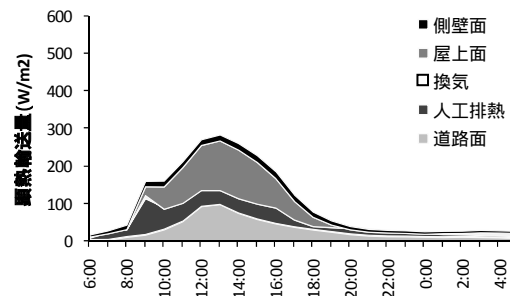
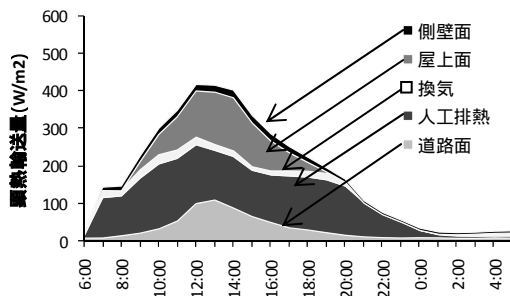


図-9 業務街区における大気への顕熱輸送量の時間変化(左図:平日,右図:休日).ただし,モデル第1層(高度3m)での結果.

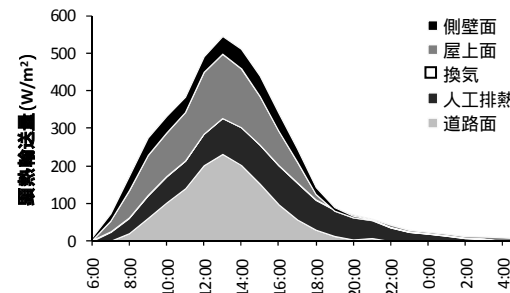
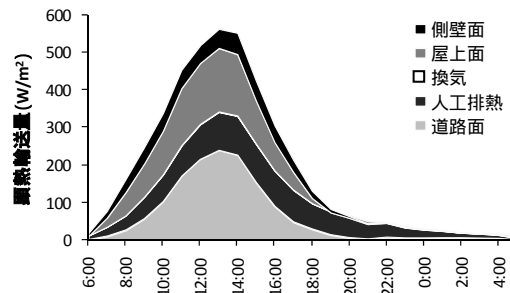


図-10 住宅街区における大気への顕熱輸送量の時間変化(左図:平日,右図:休日).ただし,モデル第1層(高度3m)での結果.

昇温メカニズム,特に建物排熱の重要性が確認された.

(d)数値モデルによる気温要因解析から,街区構造や電力需要の違いが都市熱環境に及ぼす影響を明らかにした.また,街区構造や街区用途の違いによって,街区条件に適したヒートアイランド対策の必要性を明らかにした.

謝辞

関西電力株式会社には,電力需要データを提供していただきました.また,大阪市ゆとりとみどり復興局,大阪市建設局,中央区の各ビル管理者,大阪府警本部ならびに各所轄の多くの方に,気温測定器の設置に協力していただきました.また,数値モデルのパラメータ設定に平成12年度大阪市建物現況調査に基づく建物ポリゴンデータを大阪市より着用させていただきました.この場を借りて,深く感謝いたします.

参考文献・引用文献

- 1) 佐藤大樹,村上周三,大岡龍三,吉田伸治,原山和也,近藤裕昭:ヒートアイランド緩和方策が夏季と冬季の都市熱環境へ及ぼす影響の数値解析-夏季・冬季の都市気候特性の分析及び緑化と高アルベド化の効果の検討-,日本建築学会環境系論文集,第577号,pp.55-62,2004.
- 2) 近藤裕昭,亀卦川幸浩,玄地裕,井原智彦,大橋唯太,東海林孝幸:都市気候・ビルエネルギー連成モデルによるヒートアイランド対策の評価,日本ヒートアイランド学会論文集,第1巻,pp.53-57,2004
- 3) Ohashi Y., Y.Genchi, Y.Kikegawa, H.Kondo, Hiroshi

Yoshikado, and Y.Hirano: Influence of air-conditioning waste heat on air temperature in Tokyo office areas during summer: Numerical experiments using an urban canopy model coupled with a building energy model, Journal of Applied Meteorology and Climatology, Vol.46, pp.66-81, 2007.

- 4) 鳴海大典,大谷文人,近藤明,下田吉之,水野稔:都市における人工廃熱が都市熱環境に及ぼす影響-都市熱環境評価モデルを用いたヒートアイランド現象の改善策に関する検討 その1-,日本建築学会計画系論文集,第562号,pp.97-104,2002.
- 5) 亀卦川幸浩,玄地裕,吉門洋,近藤裕昭:建築物空調エネルギー需要への影響を考慮した都市高温化対策評価手法の開発,エネルギー・資源,第22巻,pp.235-240,2001.
- 6) 原田雄介,村上周三,大岡龍三,原山和也,佐藤大樹,川本陽一:空調排熱計算を連成させた局地気候モデルによる都市気候解析,日本建築学会環境系論文集,第597号,pp.65-71,2005.
- 7) 大橋唯太,玄地裕,亀卦川幸浩:東京都心の街区内気温の空間分布とその形成要因について,環境情報科学論文集17,第17号,pp.59-64,2003.
- 8) Weather Research & Forecasting Model : <http://wrf-model.org/index.php>
- 9) 近藤裕昭,劉発華:一次元都市キャノピーモデルによる都市の熱環境に関する研究,大気環境学会誌,33巻,pp.179-192,1998.

(2008.9.30 受付)