

# 建物用途の異なる複数街区を対象とした ヒートアイランド対策の数値シミュレーション

大橋 唯太<sup>1</sup>・畔柳 秀匡<sup>2</sup>・亀卦川 幸浩<sup>3</sup>・岡 和孝<sup>4</sup>

<sup>1</sup>岡山理科大学准教授 総合情報部生物地球システム学科 (〒700-0005 岡山市北区理大町1-1)  
E-mail:ohashi@big.ous.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 岡山理科大学大学院総合情報研究科生物地球システム専攻 (〒700-0005 岡山市北区理大町1-1)

<sup>3</sup>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二丁目1-1)  
E-mail:kikegawa@es.meisei-u.ac.jp

<sup>4</sup>みずほ情報総研株式会社 環境・資源エネルギー部 (〒101-8443 東京都千代田区神田錦町3-1)  
E-mail:kazutaka.oka@mizuho-ir.co.jp

建物用途の異なる複数種の実在街区(業務・商業・住宅)を対象に, 夏季熱環境の形成要因を解析し, ヒートアイランド対策導入の最適化を数値モデルによって明らかにした. 本研究では, メソスケール気象モデル, 都市キャノピーモデル, ビルエネルギーモデルの結合型数値モデルを用いた. 街区熱収支の解析によって, 各街区で支配的な顕熱成分を特定し, 該当箇所に対するヒートアイランド対策の導入効果を定量評価した.

業務街区と商業街区では冷房排熱の大気系外放熱, 住宅街区では屋上面の高反射化が地上気温の低下に特に有効であった. 建物内電力消費の削減に対しては, 業務・商業街区は側壁被覆の改変, 住宅街区では側壁だけでなく屋上の被覆改変も有効であった. また, 複合対策の導入による相乗効果も確認された.

**Key Words :** *heat-island countermeasure, numerical simulation, multi urban districts, Osaka City*

## 1. はじめに

都市部を中心に発生するヒートアイランド現象は夏季の猛暑日や熱帯夜の日数を増加させ, 熱中症の罹患や睡眠障害など人間生活の質の低下が指摘されている<sup>1)</sup>. また, 都市部のエネルギー問題にまでヒートアイランドの影響は波及し, 冷房需要に伴う電力消費の増大が生じている. 東京23区では, 夏季の日最高気温が1°C上昇すると, 170万kWの最大電力需要が増加する.

これら問題の誘因となっている都市部の気温上昇を抑制する様々なヒートアイランド対策技術が, 研究機関・企業・行政, また相互間の協力によって開発や試験がなされてきている. しかし, 実地への対策導入はその規模や経費を理由に容易とは言えず, 実効果の定量評価には数値シミュレーションが活用されることが多い. 数値シミュレーションには, 大気流体方程式を基礎とする格子型モデルが主流であり, 東京や大阪といった大都市を対象に計算研究例が多く散見される<sup>2,3)</sup>.

都市部を構成する単位空間は「街区」とみなされ, 数百m四方スケールの範囲を有する. ヒートアイランド対

策は, この単一街区もしくは複数の街区に跨る範囲で導入される. 東京都心部を対象とした数値シミュレーション<sup>4)</sup>からは, 業務街区と住宅街区で建物の緑化によって日平均0.4~0.6°C, 高反射化によって同0.3°Cの気温低下が示された. これらの対策技術は建物への熱負荷を低減する効果もあり, 住宅街区ではそれぞれ床面積当たり3.5W/m<sup>2</sup>と1.8W/m<sup>2</sup>の電力消費削減が報告されている. したがって, 建物に対するヒートアイランド対策導入は, 気温上昇の抑制のみならず電力消費量の削減にも貢献が期待される. 建物への熱負荷低減は冷房排熱を減らし, 結果として気温上昇の抑制にもつながる.

一方, 大阪市の業務街区と住宅街区を対象とした気温・電力の計測と数値シミュレーション<sup>5)</sup>からは, それら街区の気温には差異が認められ, 大気に輸送される顕熱バランスが街区間で異なることが明らかにされた. その結果から, 街区構造や建物用途に支配される顕熱要素を勘案した最適なヒートアイランド対策の導入が指摘されている.

このように, 都市を構成する種々の街区へのヒートアイランド対策導入時の気温と電力消費, 双方に対する定

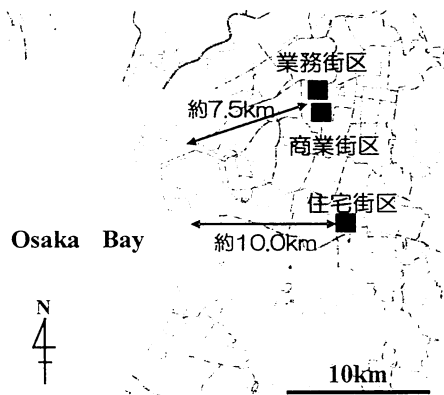


図-1 大阪市における研究対象街区の位置。

量効果の相違を確認し、街区に適切な対策を選択することが望ましい。しかし、先述の既往研究<sup>4)</sup>では業務街区と住宅街区について議論されているが、都市部を構成する代表街区である飲食店やデパートなど商業店舗が集まる街区（商業街区）については、未検討である。特に、商業街区の電力需要パターンは業務・住宅街区とは大きく違う<sup>6)</sup>ため、最適なヒートアイランド対策の選択と、それによって得られる効果も異なってくることが予想される。

本研究では、大阪市の既往研究<sup>9)</sup>で未検討だった商業街区を加えた種々の街区を対象に、熱収支解析とその結果に基づくヒートアイランド対策導入の最適化を、数値シミュレーションによって評価することを目的とする。

## 2. 研究対象街区

### (1) 街区構造

研究対象街区の位置関係を、図-1に示す。大阪市内の各種建物用途を有する生活街区「業務街区」（中央区）・「商業街区」（中央区）・「住宅街区」（東住吉区）を、本研究での解析対象とした。

業務街区は業務系用途の高層建築物群が占有する1km四方の領域であり、大阪市平成12年建物現況調査から領域内の64%が業務系建物とされている。商業街区は商業デパートや飲食店などが占有する繁華街であり、同様に1km四方領域を選定した。この領域の63%が商業用途建物とされており、先述の業務街区からは1.5kmほど離れて位置する。住宅街区には、低層戸建住宅と集合住宅棟が混在する1km四方領域を選定した。この領域の69%が住宅用途建物であり、業務・商業街区からは南南東方向に9kmほど離れて位置する。以上の街区を大阪の典型的

表-1 研究対象街区の平均構造（平成12年大阪市建物現況データの解析より）。

	道路幅 (m)	建物幅 (m)	天空率 (-)
業務街区	6.7	16.5	0.26
商業街区	5.3	12.5	0.26
住宅街区	6.0	10.5	0.52

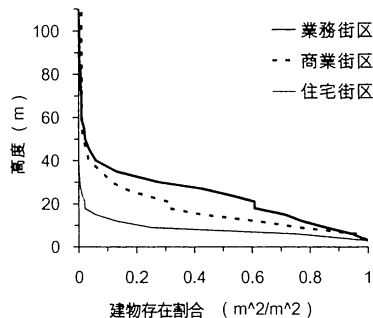


図-2 研究対象街区における建物存在割合の高度分布。

な生活活動空間であるとみなし、以後の解析対象とする。

大阪市より提供された平成12年建物現況調査に基づく建物ポリゴンデータを解析し、対象街区の平均道路幅・建物幅・天空率と、建物存在割合（該当高度における総床面積÷1階部分における総床面積）を算出した（表-1及び図-2）。その結果、業務街区の平均建物高度は、23.1mであった。商業街区は18.0mと、業務街区よりも建物群が低いものの道路幅が狭いため天空率が業務街区と同程度になっている。住宅街区は、業務街区に比べて建物高度が半分以下と低いため、天空率の数値も2倍にまで大きくなっている。

### (2) 電力需要

各街区の空調熱源構成比については、下田ほか<sup>7)</sup>による大阪市業務系街区の建物延床面積と空調熱源機器割合の関係調査をもとに推定した（図-3）。各街区の建物延床面積から空調熱源機器の構成割合を算出すると、業務街区では空冷式が49.1%、商業街区では61.1%となった。ただし、住宅街区は延床面積に依らず全て電動式空冷空調とした。

各街区を含む変電所で2007年8月4～14日に計測された電力供給エリアの単位延床面積当たりの電力消費量を、図-4に示す。単位延床面積当たりの電力消費量は、商業街区が他の街区に比べて非常に大きい。業務街区では平日と

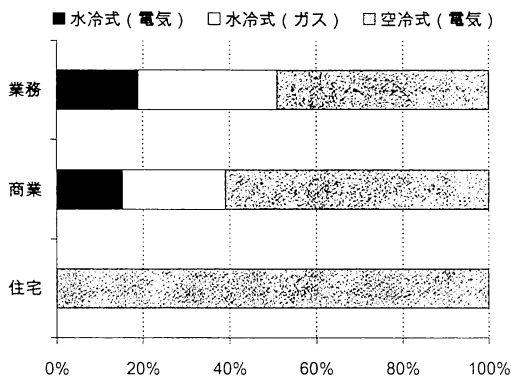


図3 各街区における空調熱源の構成割合。

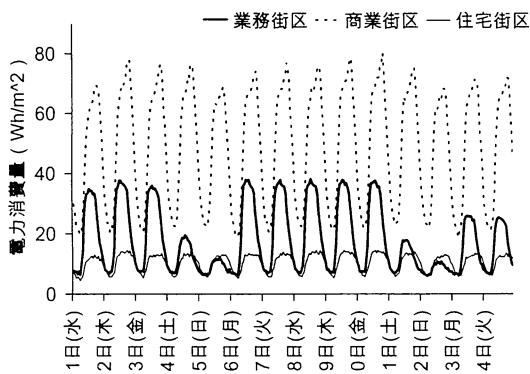


図4 各街区を含む変電所で計測された電力消費量の時系列変化(2007年8月4~14日)。ただし、電力供給エリアの単位延床面積当たりの数値で示してある。

休日(土日)間の電力消費量の差が顕著であるのに対して、商業街区と住宅街区は曜日に関係なく電力消費量があまり変化しない点が特徴的である。また、業務街区では13~14時に電力消費量のピーク値が現れる一方で、商業街区は19~20時にピークが、住宅街区では13~21時の長い時間帯に電力の極大値が認められる。

### 3. 数値シミュレーション

#### (1) 数値モデルの概要

本研究では最終的に水平 1km スケールの街区大気の大気熱環境を再現するため、メソスケール気象モデル(WRF)<sup>8)</sup>、都市キャノピーモデル(CM)<sup>9)</sup>、ビルエネルギーモデル(BEM)<sup>10)</sup>の結合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。一方、CMでは数百 m 街区スケールの気象変動

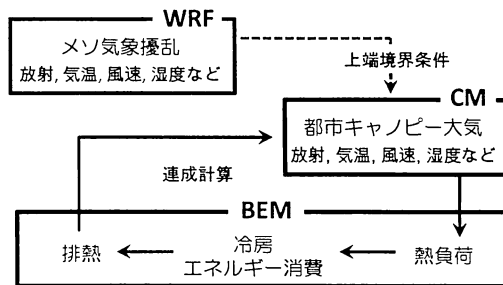


図5 数値モデルの計算フロー。

を、BEMでは建物への熱負荷計算と冷房排熱量を予測する。モデル間の結合・計算フローを、図-5に示す。

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群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重ネステイングで設定し、各領域の水平メッシュ幅を9km, 3km, 1kmと次第に解像度を上げた。初期値・境界値には、気象庁メソ観測解析値(大気)とNCEP客観解析値(土壌・海面水温)を用いた。気象物理スキーム等その他詳細は、紙面の都合により割愛する。

CMは、近藤・劉<sup>9)</sup>によって開発された鉛直一次元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つ直方体形建物が整形配列した街区を仮定している。建物高度の不均一性は、モデル各高度における建物の存在率を与えることで考慮している。風速、温度(温位)、湿度(比湿)など、都市キャノピー内の気象場がここでは計算される。

BEMは、亀卦川ほか<sup>10)</sup>によって開発された都市大気と建物間の熱交換過程を計算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建物室内の熱収支計算をおこなう。窓面からの透過日射、壁面を貫流する熱、換気に伴う熱の流入出、照明やOA機器・人体からの発熱などから建物内熱負荷を算定する。これらの熱負荷は、冷房運転によって排熱としてキャノピー大気へと排出される。排熱量は、熱源機器固有のCOP設定値をもとに算定され、空冷式か水冷水式かを考慮して顕熱と潜熱に分離される。

WRF・CM・BEM、3つの数値モデルの結合計算によって、建物内人間活動を考慮した街区気象計算が可能となる。CMとBEMの結合計算部分に関する精度検証や、CM及びBEM中のパラメータ値の感応度実験については、Ohashi et al.<sup>11)</sup>によって検証されている。そこでは、種々のパラメータの数値を常識的な設定範囲で変動させても、

地上気温への影響は0.1°C未満であることが示されている。

## (2) 計算条件の設定

### a) WRF

近畿地方を中心とする3重ネスティングによって、最小領域が大府全域を含むような位置をWRFでは選択した。このような広域スケールからのダウンスケーリングによって、総観スケール気象の変動を考慮した、局地スケールで発生する気象場が計算可能となる。本研究では、上記の大府全域を含む最小領域での計算結果を実際の解析に用いていく。数値積分に必要な初期値と境界値には、気象庁メソ客観解析値（大気；水平解像度約10km）とNCEP客観解析値（土壌・海面；水平解像度1°）を使用した。境界値については、計算最大領域の外縁から3時間毎に入力した。

メソスケール気象場は、都市キャノピーの影響を受けて変形・変質を生じる<sup>12)13)</sup>。したがって、CM・BEMによって計算される運動量・顕熱・潜熱フラックスをWRFに反映させるべきであるが、その仕組みをまだ構築できていない。そこで、代わりにWRFのサブモデルとして実装されている単層都市キャノピーモデル<sup>14)</sup>を使用した。これによって、建物が存在することによる天空率、放射環境、人工排熱、建物抵抗がメソスケールの風速や気温に与える影響を考慮することができる。

本研究では、WRFで標準設定されている土地利用と人工排熱の情報に対して、以下の2点を改良した。①国土地理院の10mメッシュ細密数値情報に基づき、大府の大部分領域を「低層住宅」・「中高層住宅」・「商業・業務建物」用地の3タイプに細分化し、最小領域の計算解像度である1kmメッシュとして都市部を再集計した。計算時には、各用地が持つ適切な各種物性パラメータ（粗度長など）の数値を与えた。②大阪都市部のエネルギー消費原単位から推計された人工排熱を入力した。この人工排熱量は、最小領域1km解像度として1時間毎にWRFに与えた。

### b) CM

各街区の構造を表す平均道路幅、平均建物幅、平均建物密度の高度分布をCMには入力した（表-1と図-2）。建物の壁体構造や物性値については、既往研究<sup>15)</sup>などに基づき、各街区に適した数値を設定した（表-2）。なお、住宅街区は、戸建住宅と集合住宅それぞれのケースに対して設定し、計算をおこなった。建物階高は、業務街区で3.4m、商業街区で3.5m、住宅街区で戸建の場合3.3m（集合の場合3.1m）に設定した<sup>16)</sup>。また、業務・商業街区では屋上壁30cm、側壁22cmの厚さ、戸建（集合）住宅街区では屋上壁5cm（20cm）、側壁6cm（21cm）の

表-2 CMの計算設定。

		業務・商業 街区	住宅街区
建 物 壁 体			
表面アルベド (-)		0.19	0.19
表面射出率 (-)		0.96	0.96
体積熱容量 ( $\times 10^6 \text{J/m}^3 \cdot \text{K}$ )	屋上	1.60	0.93
	断熱層	0.05	—
	側壁	1.79	0.89
熱伝導率 ( $\text{W/K} \cdot \text{m}$ )	屋上	0.47	0.22
	断熱層	0.03	—
	側壁	0.67	0.30
窓 面			
日射透過率 (%)		30.0	50.0
面積率 (%)		33.1	18.0
道 路			
表面アルベド (-)		0.19	0.19
表面射出率 (-)		0.96	0.96
体積熱容量 ( $\times 10^6 \text{J/m}^3 \cdot \text{K}$ )	上層	1.92	1.90
	下層	1.74	1.74
熱伝導率 ( $\text{W/K} \cdot \text{m}$ )	上層	1.37	0.70
	下層	1.00	1.00
緑被率 (%)		3.4	20.0

表-3 BEMの計算設定その1。

	業務・商業 街区	住宅街区 戸建 (集合)
冷房設定温度 (°C)	26.0	27.0
冷房設定湿度 (°C)	50.0	60.0
単位床面積当たりの 外気導入量 ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ )	5.0 / 10.0	3.0
単位床面積当たりの 在室人員 (人/ $\text{m}^2$ )	0.2 / 0.4	0.038
人体発熱量 顕熱 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	54.7	54.7
人体発熱量 潜熱 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	64.0	64.0
換気口 (外気導入) の位置	各階	各階
延床面積に占める冷房面積 の割合 (%)	60.0	40.0 (77.5)

厚さとした。窓については、業務・商業街区ではブラインド、住宅街区ではレースカーテンの使用を想定した。

道路上の緑被は、同時期における研究対象地域の衛星画像解析より、アルベド0.14、射出率0.97に設定した<sup>17)</sup>。

表4 BEMの計算設定その2.

	熱源方式	冷却方式	エネルギー源	定格COP	排熱位置	占有率(%)
業務街区 (商業街区)	直焚吸収式冷温水機	水冷	都市ガス	0.97	屋上	32.1 (23.7)
	水熱源ターボ冷凍機	水冷	電動	4.71	屋上	18.9 (15.2)
	ビルマルチ	空冷	電動	2.58	屋上	24.5 (30.5)
住宅街区	家庭用エアコン	空冷	電動	4.50	各階	100.0

c) BEM

各街区における空調関連の設定を、表-3と表-4にまとめる。既往研究や文献<sup>15)18)19)</sup>を参考に、適切な数値を与えた。冷房運転スケジュールは、各街区で実際に計測された電力消費量の特別値(図-4)を平日と休日に分けて解析し、総電力の50%が空調運転に使用される<sup>20)</sup>として、(最大電力量の時刻を1.0とした)標準化した特別データをBEMに入力した。室内の照明やOA機器による電力消費量は、各街区で実際に計測された電力消費量の50%とみなして1時間ごとに与えた。

図-3や表-4からわかるように、業務・商業街区では水冷式空調も多く存在する。水冷式の排熱源は冷却塔であり、排熱を動的に顕熱・潜熱へと分離する冷却塔モデルをBEMでは導入している<sup>15)</sup>。

4. 結果

(1) 数値モデルの再現性

街区内で実際に計測された地上気温・電力消費量と数値モデルで計算されたそれらを比較することで、数値シミュレーションの再現性を検証した(図-6)。視測は2007年8月1~14日に実施し、各街区内の地上気温を10地点で計測した。これらの地点は、街区を構成する東西・南北道路と交差点が均等に含まれるよう吟味し、選択された。その10地点の平均気温を、該当する街区の空間代表気温とみなした。時間については、正時毎に10分平均を施している。

地上(高度1.5m)の気温はいずれの街区も相関係数は高いものの、計算値が過小評価しており、平均誤差は業務街区で-0.57℃、商業街区で-0.31℃、戸建(集合)住宅街区では-0.38(-0.37)℃であった。しかし、街区気温の相対関係はよく再現できており、住宅街区で気温の日振幅が大きく、商業街区で小さくなる特徴を示していた。(単位延床面積当たりの)電力消費量の平均誤差は、業務街区で+1.48Wh/m<sup>2</sup>、商業街区で-2.68Wh/m<sup>2</sup>、

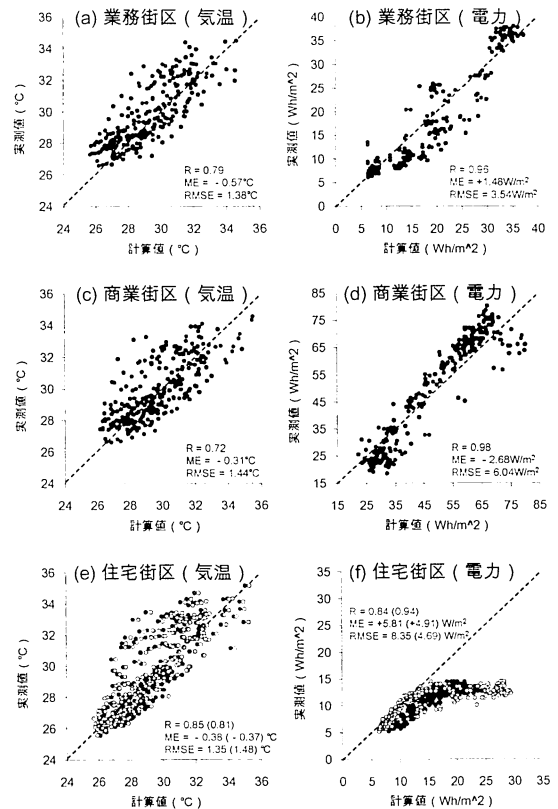


図-6 (a)(b)業務街区, (c)(d)商業街区, (e)(f)住宅街区において実測・計算された地上気温(左段)・電力消費量(右段)の比較(2007年8月4~12日)。電力消費量は、対象街区の単位延床面積当たりの数値で示している。Rは相関係数, MEは平均誤差(括弧内の数値は集合住宅), RMSEは2乗平均平方根誤差の数値を表す。住宅街区(c)(f)の黒丸が集合住宅, 白丸が木造住宅の結果を示す。

住宅街区で+5.81(+4.29)Wh/m<sup>2</sup>であった。業務街区と商業街区の計算は定量的にもよく再現できたものの、住宅街区は日中の過大評価が目立った。

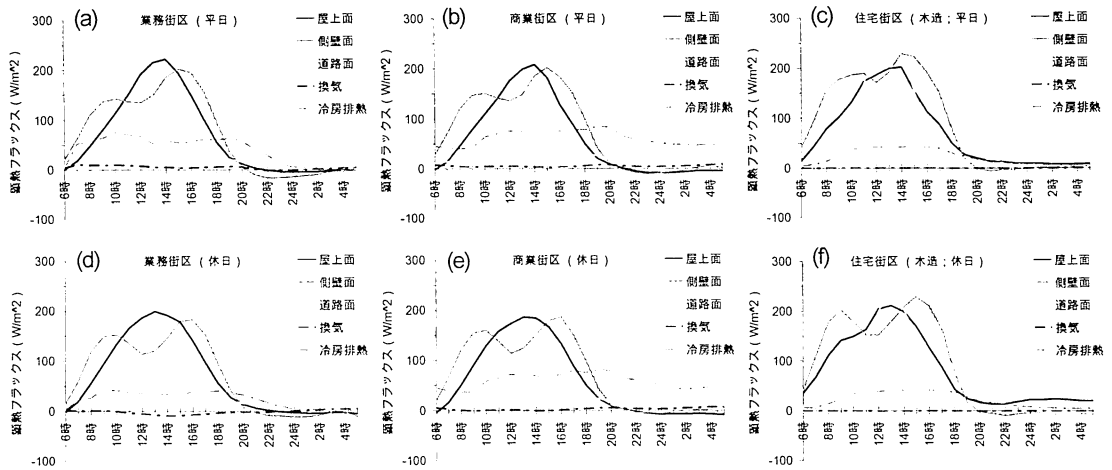


図-7 (a) 業務街区, (b) 商業街区, (c) 住宅 (戸建) 街区における街区大気への顕熱輸送量の時間変化。

(a)~(c)平日 (8月6~10日) と(d)~(f)休日 (8月4~5日, 11~12日) に分けてアンサンブル平均した結果を示す。ただし, 単位土地面積当たりの顕熱フラックスとして表している。

## (2) 顕熱収支の解析

街区ごとの気温形成要因を明らかにするため, 数値モデルによる顕熱収支解析をおこなった。モデル内部において街区気温を支配する (大気に与えられる) 顕熱成分としては, 建物や道路表面から輸送される顕熱と人間活動に由来する顕熱に大別される。気温の決定に用いられる温位の保存方程式に付加された「屋上面からの顕熱輸送量」, 「側壁面からの顕熱輸送量」, 「道路面からの顕熱輸送量」, 「換気による顕熱流量」, 「冷房による排熱量」を, 平日 (8月6~10日) と休日 (8月4~5日, 11~12日) に分けて比較した (図-7)。

平日の業務街区では, 側壁からの顕熱供給量が最大となっており, 1時間値の日積算で約 $1.7\text{kW/m}^2$  (ただし, 顕熱が負の場合には吸熱として値を引いた) に達していた。これに対する比率で他からの顕熱供給量を表せば, 屋上は92%, 冷房排熱は57%, 道路は43%, 換気は6%に相当した。夜間に限れば, 19~22時に冷房排熱以外の顕熱供給が小さくなるため冷房排熱が大気加熱に寄与していることが推測される。一方の休日は, 平日の場合とあまり変化がないものの建物内での人間活動が存在しないために, 側壁からの日積算顕熱に対する比率で冷房排熱が35%にまで減少していた。

平日の商業街区では, 業務街区と同様に側壁からの顕熱供給量が最大となり, 日積算で約 $1.8\text{kW/m}^2$ に達していた。この数値に対して, 屋上78%, 冷房82%, 道路50%, 換気7%の顕熱供給量が認められた。商業街区は業務街区よりも冷房排熱がかなり多いことが特徴的と言え, 夜間も継続して (単位土地面積当たり)  $50\text{W/m}^2$  近く存在していた。したがって, 夜間の気温は冷房排熱の影響を

強く受けていることが予想される。一方の休日は, 平日に見られた特徴と定量的にもほとんど差異が認められなかった。

平日の木造戸建 (集合住宅) の住宅街区では, 側壁からの顕熱供給量が最大で, その日積算値は約 $2.1\text{kW/m}^2$ に達していた。この側壁の顕熱供給量に対して, 屋上は80 (63) %, 道路は69 (72) %, 冷房は25 (25) %, 換気は0.0 (-0.5) %の供給量に相当した。

以上の熱収支解析から, 業務街区と商業街区では屋上面・側壁からの顕熱輸送と冷房排熱が, 住宅街区では屋上面・側壁・道路面からの顕熱輸送が大気加熱に大きく寄与していることが明らかとなった。

## (3) ヒートアイランド対策の導入効果

ヒートアイランド対策は, 建物や道路などの都市表面の改変と人工排熱 (エネルギー消費) の削減に大別される。本研究では, 建物屋上・壁面の緑化, 建物屋上・壁面・道路面の高反射化, 冷房排熱の大気系外放熱を検討した。4-(2)の解析結果をもとに, 各街区で選択した対策を表-5に示す。

高反射塗料は屋上・ (窓を除く) 側壁・道路それぞれに全面への導入が可能とし, アルベドを0.19から屋上は0.86 (白色), 側壁と道路は0.64 (淡い有色)<sup>4)</sup>に変化させた (以降, 屋上・壁面・道路アルベド)。緑化は, 屋上と (窓を除く) 側壁に面積比60%の導入を想定した<sup>4)</sup>。屋上は20cm厚の土壌上を芝で緑化した (以降, 屋上・壁面緑化)。その緑化部分は, 芝の蒸発効率が0.2~0.4に相当する植生群落コンダクタンス $3\text{mm/s}$ , 表面アルベド0.14, 表面放射率0.97に設定して熱収支計算をおこなっ

表-5 各街区の対策導入ケース。各設定の詳細は、本文中4(3)を参照。

対象	対策	業務・商業 街区	住宅街区 戸建(集合)
屋上	緑化		○
	高反射化		○
側壁	緑化	○	○
	高反射化	○	○
道路	高反射化		○
排熱	大気系外放熱	○	

た。被覆対策以外のケースとして、冷房排熱を地下や海水などの大気系外へ放熱させる対策効果<sup>21)</sup>も検討した(以降、ヒートシンク)。

図-7と同様に、対象期間を平日と休日に分けて平均した地上気温の低下量を、図-8に示す。最も効果を確認できたのは商業街区のヒートシンクであり、平日・休日とも日平均値で0.64℃、最大では平日1.0℃、休日0.97℃の気温低下が認められた。業務街区と違って休日にも人間活動が活発なため、冷房排熱カットが恒常的に大きな効果を期待できることがわかる。また、この結果から、大阪市の中心活動地域では夏季の冷房利用によって1℃近くも気温が上昇している事実も示唆される。これは、東京23区の業務街区を対象とした既往研究<sup>11)</sup>で報告されている数値と同程度である。住宅街区では屋上アルbedoが最も効果的であり、戸建(集合)で平日に日平均0.18(0.23)℃、休日に0.18(0.25)℃の気温低下が認められた。日平均値としては顕著ではないが、最大値を見れば平日0.52(0.50)℃、休日0.59(0.56)℃、気温が低下している。

同様に解析した各街区の電力消費削減率を、図-9に示す。最も削減効果が大きかったのは戸建住宅で屋上アルbedoを導入した場合で、平日に13%の電力削減が認められた。また、集合住宅でも平日に10%の削減と、住宅街区への屋上アルbedoが有効であることがわかる。側壁アルbedoでは、壁面から建物屋上面や窓面への反射光が増えてしまうことで冷房顕熱負荷が日中に1.5倍前後にまで増大してしまうため、屋上アルbedoに匹敵する気温低下や電力削減に結びつきにくい。一方、単位延床面積当たりの電力削減量で比較すると(図-9中の数値)、業務街区や商業街区でも住宅街区と同程度の削減量が得られていることがわかる。

以上の個別対策で得られた結果を参考に、特に効果が期待できた対策の複数を同時に導入する場合を検討してみる。業務街区と商業街区ではヒートシンクと側壁緑化、住宅街区では屋上・側壁・道路アルbedoを導入した計算

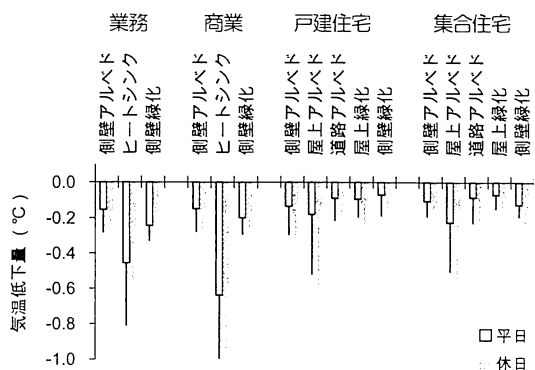


図-8 平日と休日それぞれアンサンブル平均された、各街区における対策導入時の地上気温の低下量(℃)。棒が日平均値を、線が最大値を表す。

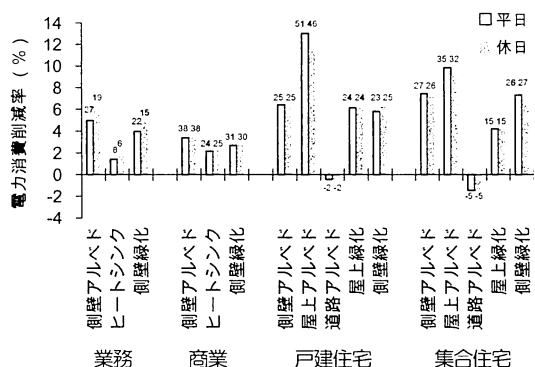


図-9 平日と休日それぞれアンサンブル平均された、各街区における対策導入時の日積算電力消費の削減率(%)。棒に記された数値は、単位延床面積当たりの日積算電力消費削減量(Wh/m<sup>2</sup>)を表す。

をおこなった(図-10)。全ての複合対策で最大1℃以上の気温低下が認められ、日平均値でも0.5℃以上の低下が期待できる。街区の中では、商業街区で平日・休日ともに最大1.3℃、日平均で0.9℃の気温低下が最大であった。また、これらの複合対策効果は、気温の日平均値を議論する場合には個別の対策で得られた効果の線形和でほぼ説明できるが、気温の最大低下量で見た場合には個別対策の気温低下量の和よりも大きくなることがわかる。東京23区を対象とした被覆対策とヒートポンプ給湯機の導入を検討した既往研究<sup>22)</sup>でも、類似した特徴が報告されている。

複合対策導入時の電力消費削減率を、図-11に示す。個別対策時の結果(図-9)と同様に、住宅街区での削減率が大きく、戸建住宅で平日23%と休日22%、集合住宅で平日17%と休日16%認められた。これは、個別対策時に得られる削減率(量)の線形和に比べて明らかに増大

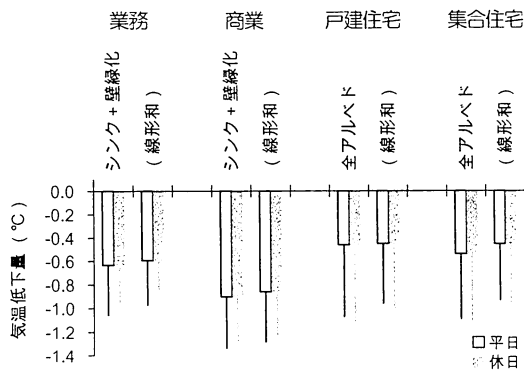


図-10 図-8と同様。ただし、各街区における複合対策導入時の地上気温低下量と、個別対策で得られた気温低下量の線形和。

しており、住宅街区では複合対策の導入による相乗効果が期待できることを意味する。

## 5. まとめ

建物用途の異なる複数種の街区を対象に夏季熱環境の形成要因を解析し、最適なヒートアイランド対策の導入効果を数値モデルによって明らかにした。本研究では、大阪市内で代表とされる業務街区、商業街区、住宅街区を選定した。得られた結果を以下にまとめる。

- メソスケール気象モデル (WRF) , 都市キャノピーモデル (CM) , ビルエネルギーモデル (BEM) の結合型数値モデルによって、都市熱環境 (地上気温) と電力消費量の再現を試みた。いずれの街区も、計算は概ね実測で得られた特徴を再現できていた。
- 数値モデルによる街区の熱収支解析から、平日の業務街区では総顕熱のうち31%が屋上面、34%が側壁、19%が冷房排熱に由来、商業街区では25%が屋上面、31%が側壁、26%が冷房排熱、戸建 (集合) 住宅街区では29 (24) %が屋上面、37 (39) %が側壁、25 (28) %が道路に由来することが明らかとなった。
- 上記の顕熱支配箇所に対してヒートアイランド対策を導入し、地上気温の低下量と電力消費の削減量を推定した。対策の個別評価では、業務街区と商業街区で冷房排熱の大気系外放熱、住宅街区では屋上アルベドが最も気温低下に有効であった。業務街区は平日 (休日) 最大0.81 (0.57) °C、商業街区は1.0 (0.97) °C、住宅街区の戸建0.52 (0.59) °C、集合0.50 (0.56) °Cの気温低下が認められた。建物内電力の削減には、いずれの街区も建物への被覆対策が最も効果的であった。単

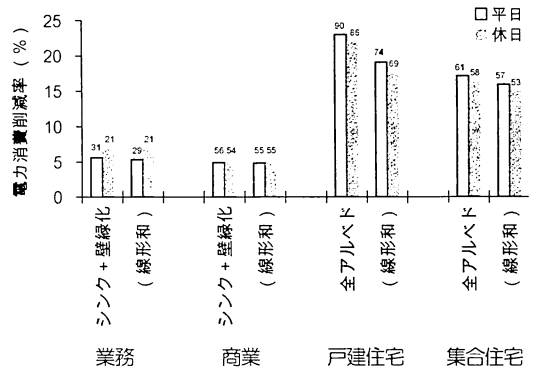


図-11 図-9と同様。ただし、各街区における複合対策導入時の電力消費削減率と、個別対策で得られた電力消費削減率の線形和。

位延床面積当たりの日積算電力消費量に対して、業務街区で平日 (休日) 5.0 (6.2) %、商業街区で3.4 (3.4) %、住宅街区の戸建13.0 (11.6) %、集合9.9 (9.1) %の削減が得られた。

- 個別対策評価で気温低下と電力削減が認められた対策を複合導入したケースを各街区で設定し、計算をおこなった。その結果、いずれの街区でも最大で1°C以上の気温低下が認められ、対策の個別に得られる気温低下量の線形和を超える効果が得られた。また、住宅街区では、対策の個別に得られる電力削減量の線形和を上回る削減も認められた。

謝辞：関西電力株式会社より、変電所電力供給量データを御提供いただきました。数値モデルの設定などでは、東京電力株式会社の山口和貴氏より御助言をいただきました。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 井原智彦, 玄地 裕：被害算定型ライフサイクル影響評価手法によるヒートアイランド現象の環境影響評価, 日本建築学会環境系論文集, Vol.73, pp.1407-1415, 2008.
- 浦野 明, 稲井康弘, 花木啓祐：街区における熱環境改善計画の効果に関する熱収支・エネルギー解析, 環境システム研究論文集, Vol.29, pp.253-262, 2001.
- 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, No.597, pp.65-71, 2005.
- 平野勇二郎, 大橋唯太, 亀卦川幸浩, 近藤裕昭, 玄地 裕：都市キャノピー・ビルエネルギー連成モデルを用いた東京都心部のヒートアイランド対策と冷房負荷低減策の評価, 環境シ



- テム研究論文集, Vol.33, pp.179-188, 2005.
- 5) 畔柳秀匡, 大橋唯太, 亀卦川幸浩, 岡 和孝, 重田祥範, 平野勇二郎, 日下博幸, Fei Chen : 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—, 水工学論文集, Vol.53, pp.289-294, 2009.
  - 6) 西村伸也, 鍋島美奈子, 西岡真稔, 谷口一郎, 榊元慶子, 野邑奉弘 : ヒートアイランドから見た大阪市域におけるエネルギー供給の時空間特性, 日本ヒートアイランド学会論文集, Vol.1, pp.15-22, 2006.
  - 7) 下田吉之, 高原洋介, 鳴海大典, 水野 稔 : 中心業務地区を対象としたエネルギーフローの現状把握と環境影響改善可能性の評価, 日本建築学会総合論文集, No.1, pp.93-99, 2003.
  - 8) Weather Research & Forecasting Model : <http://wrf-model.org/index.php>
  - 9) 近藤裕昭, 劉 發華 : 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, Vol.33, pp.179-192, 1998.
  - 10) 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, Vol.22, pp.235-240, 2001.
  - 11) 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. *J. Appl. Meteor. Clim.*, Vol.46, pp.66-81, 2007.
  - 12) Yoshikado H. and H.Kondo : Inland penetration of the sea breeze over the suburban area of Tokyo, *Bound-Layer Meteor.*, Vol.48, pp.389-407, 1989.
  - 13) Ohashi Y. and H.Kida : Effects of mountains and urban areas on daytime local-circulations in the Osaka and Kyoto regions. *J. Met. Soc. Japxn.*, Vol.80, pp.539-560, 2002.
  - 14) Kusaka H., H. Kondo, Y. Kikegawa and F. Kimura : A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models, *Bound-Layer Meteor.*, Vol.101, pp.329-358, 2001.
  - 15) 亀卦川幸浩, 玄地 裕, 近藤裕昭 : 建築における空調熱源と電力供給システムの構成が夏季の都市熱環境に及ぼす影響, 環境システム研究論文集, Vol.33, pp.189-197, 2005.
  - 16) 足永靖信 : 「都市の通風可能スペースに関わる3次元データベースの構築」報告書, (財)日本建設情報総合センター研究助成事業, 2006. <http://www.jacic.or.jp/kenkyu/8/8-9.pdf>
  - 17) 平野勇二郎, 外岡秀行, 大橋唯太, 亀卦川幸浩, 重田祥範, 高根雄也, 井村秀文 : 衛星-地上同期観測と都市気候シミュレーションによる大阪市域の都市熱環境解析, 日本リモートセンシング学会第45回学術講演会論文集, pp.31-32, 2008.
  - 18) 井上宇市 編 : 空空調とハンドブック (改訂5版), 丸善株式会社, 2008.
  - 19) 全国地球温暖化防止活動推進センターWebサイト (省エネルギー家電ファクトシートその2「エアコン」) <http://www.jccca.org/content/view/full/1326/888/>
  - 20) (財)住宅・建築省エネルギー機構 : 運用管理システムの適正化等による効果分析調査報告書, pp.16-24, 1997.
  - 21) 玄地 裕 : ヒートアイランドの緩和方策—地域熱供給システム, 地盤蓄熱, 地下ヒートシンカー, エネルギー・資源, Vol.22, pp.50-54, 2001.
  - 22) 山口和貴, 遠藤康之, 亀卦川幸浩, 玄地 裕, 井原智彦 : 都市熱環境とエネルギー消費の関係を考慮した住宅へのヒートアイランド対策効果の評価—街区条件への依存性に関する考察—, 第24回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 31-4, 2008.

## NUMERICAL SIMULATION OF HEAT-ISLAND COUNTERMEASURE FOR DIFFERENT URBAN DISTRICTS

Yukitaka OHASHI, Hidemasa KUROYANAGI,  
Yukihiro KIKEGAWA and Kazutaka OKA

We clarified effects of the heat-island countermeasure installed in real urban districts (office, commercial, and housing areas), using a numerical model which a mesoscale meteorological model, an urban canopy model, and a building energy model were coupled each other. The analysis of heat balance in the urban district specified major sensible-heat supplies in each district, then the heat-island countermeasures were installed suitably in the model.

The heat-sink of air-conditioning waste heat and high-albedo on the roofs were effective for a temperature falls of the office/commercial and housing districts, respectively. The modifications of side-walls were effective for cut down of the electricity consumption in the office/commercial districts, while the modifications of not only side-walls but also roofs were effective.