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—

EFFECT OF ANTHROPOGENIC WASTE HEAT UPON URBAN THERMAL ENVIRONMENT

—Analyses of countermeasures for mitigating heat islands phenomena using a numerical model Part 1—

鳴海 大典*, 大谷 文人**, 近藤 明***, 下田 吉之***, 水野 稔****

Daisuke NARUMI, Fumito OTANI, Akira KONDO,

Yoshiyuki SHIMODA and Minoru MIZUNO

In this report, effect of the anthropogenic waste heat upon urban thermal environment was described.

(1) During night, the amount of anthropogenic waste heat is less than that during daytime, though the increase in temperature is about three times larger than that during daytime. (2) Zones subject to temperature rise due to anthropogenic waste heat are clearly different in location between day and night. (3) Waste heat causes the delay of changing to land breeze especially in coastal zones. (4) Night waste heat significantly raises the air temperature, and its effect continues during the morning hours. (5) Night waste heat has a stronger effect in wider areas.

Keywords : *heat island, countermeasures, urban thermal environment, anthropogenic heat, numerical model*

ヒートアイランド現象、改善策、都市熱環境、人工廃熱、数値モデル

1. はじめに

ヒートアイランド現象は都市大気に加えられた熱負荷（大気熱負荷）がもたらす環境問題である。このヒートアイランド現象による気温上昇は、夏季の快適性を低下させると同時に、空調用エネルギー消費量の増大（スパイラル的）や、都市生態系への影響、光化学オキシダントの増加などの大気環境への影響など、様々な側面に対して問題を引き起こすことが指摘されている¹⁾。これに対して近年、例えば環境省では「ヒートアイランド実態解析調査委員会」を発足し、実態解析と今後の対策指針について検討を行っているが、未だ検討事例が不足しており、対策に関する知見を蓄積していく必要があると指摘している¹⁾。本研究ではこのような状況を鑑み、都市熱環境評価モデルを用いてヒートアイランド現象の改善策に関する検討を行うことを最終的な目的としている。

ヒートアイランド現象は都市被覆状況の改変や人間活動に伴うエネルギー消費によってもたらされるものであり、多くの要因が複雑に関与している。この点に関して、尾島²⁾はヒートアイランド化の要因として「一次破壊系要因（都市被覆の改変）」と「二次破壊系要因（エネルギー消費に伴う廃熱）」に分類し、それらの相乗作用により都市熱環境が悪化していると述べている。一般に両者は独立ではなく、同時に取り扱う必要があるが、都市気候関連の既存研究では前者の「一次破壊系要因」に関して精密に取り扱った研究は

多数存在するが、後者の「二次破壊系要因」に関してはデータ整備の困難さなどから不十分（顕潜・水系の分離、部門別、時空間分布などに対して未配慮）な事例が多く、依然検討の余地が多く残されている。

これまで筆者らは、「ヒートアイランド現象は都市エネルギー代謝システムの不完全性の表れ」との認識の下で、都市エネルギーシステムの在り方について研究を進めてきた^{3) 4) 5)}。従来はヒートアイランド現象とエネルギー消費の相関に関して、「エネルギー消費量＝廃熱量」の関係を基に論じられてきた感があるが、筆者らはこのような供給サイドで熱環境問題を論じることは不十分であり、廃熱の排出形態や排出時間を考慮した廃棄フェーズのエネルギー量が必要であることを提案してきた。以上の概念に基づき、既報⁶⁾では、顕潜熱や水系排出への分離、時間特性の考慮、さらには部門（民生・産業・交通）別データの必要性に配慮した上で、大阪府域を対象とするエネルギーフローを積み上げベースで作成した（以降エネルギー環境データベースと称する）。本報では、このエネルギー環境データベースを都市熱環境評価モデル⁷⁾の地表面境界条件として使用することによって、都市における人工廃熱が都市熱環境に及ぼす影響に関して検討を行った。なお、次報では都市熱環境改善策としての各種エネルギーシステム変更に伴う都市熱環境への影響に関して検討を行うことを予定している。

* 大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻
助手・修士(生活科学)

** 阪急電鉄(株) 修士(工学)

*** 大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻 助教授・工博

**** 大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻 教授・工博

Research Assoc., Dept. of Environmental Eng., Osaka Univ., M. Liv.

Hankyu Corporation, M. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Environmental Eng., Osaka Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Environmental Eng., Osaka Univ., Dr. Eng.

2. 気象場の計算方法

2.1 計算モデルの概要

本研究で用いる都市熱環境評価モデル⁷⁾は、運動方程式、温位・比湿保存式及び連続式の各基礎方程式に加え、乱流モデル、接地境界層モデル、地表面熱収支モデル、都市キャノピーモデルの各サブモデルで構成される。なお、モデルの詳細は呉ら⁸⁾に詳しい。鉛直方向の拡散係数に関しては、大気境界層を接地境界層とそれより上空のエクマン層に分け、接地境界層内ではMonin-Obukhovの相似則に基づくBusinger et al.⁹⁾の提案式を、エクマン層についてはMellor-Yamadaの乱流Closureモデル(level2.5)¹⁰⁾を用いて決定した。地表面熱収支モデルについてはDeardorffによる植生モデル¹¹⁾およびAcs et al.による土壌モデル¹²⁾をそれぞれ用いた。

2.2 計算領域

本論文では、太平洋から紀伊水道を含む領域を対象とすることによって、大阪府域で強く卓越する広域海風(特徴は3節で後述する)の再現を試みた¹³⁾。但し、計算対象領域が広範囲になる場合、計算機資源の制約上、解像度の悪化が避けられない。そこで、先述の領域内に小計算領域を設定し、両領域をネスティング手法で結合することによって、大阪府域内の局所的な地域特性を検討できるように配慮した。以降では前者を「広領域」、後者を「狭領域」と定義する。計算領域の概況を図1に、領域の概要を表1に示す。広領域

図1 計算領域

図2 評価対象地点の位置

表1 計算領域の概要

	計算領域(km)	grid数	gridサイズ
広領域	190×370×5	38×74×15	5km
狭領域	100×100×5	100×100×15	1km

のメッシュサイズは5km、狭領域は1kmとした。本論文の以降で評価の対象とする各計算メッシュの位置関係を図2に示す。

2.3 土地利用

地表面熱収支モデルで用いる各物性値(アルベド、熱容量、熱伝導率など)を設定するため、国土数値情報土地利用区分データを用いて、全計算対象領域の土地利用分類を行った。分類は、数値情報の15分類から「裸地」、「都市」、「草地」、「森林」、「水域」の5分類に集約させた。各土地利用分類毎の地表面熱収支パラメータの値を表2に示す。なお、各値は文献¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾を参考に決定した。

2.4 都市キャノピー形状

都市キャノピーについては、図3に示すように、あるメッシュにおいて $W_{sx} \times W_{sy}$ の敷地内に、横 W_{bx} ×縦 W_{by} ×高さ H_c の建物が規則正しく格子状に配置されると仮定してモデル化し、モンテカルロ法に基づく光子追跡によって、都市キャノピー内の放射環境を再現した。モデルの詳細はKondo et al.¹⁶⁾に詳しい。建蔽率 η と建物高さ H_c に関しては、大阪府全体の建物用途別延べ床面積データ(1993年)を用いて約1km四方のメッシュデータ(経緯度座標系第3次メッシュ)として決定した。

2.5 人工廃熱

既報⁶⁾で作成した民生・産業・交通の各部門別、かつ、顕熱・潜熱別に集計したエネルギー環境データベースを人工廃熱データとして使用した。本データベースは約1km四方のメッシュデータ(経緯度座標系第3次メッシュ)として月別および時刻別に整備してお

図3 都市キャノピー形状のモデル化

図4 本研究で設定した各部門別人工廃熱の排出形態

表2 各土地利用分類ごとの地表面熱収支パラメータ

	粗度 [m]	アルベド [-]	熱伝導率 [W/m·K]	熱容量 [10 ⁶ J/m ³ ·K]	ポーエン比 [-]	植生被覆度 [-]
裸地	0.01	0.14	1.81	1.9	2	0
都市	0.5	0.18	2.18	2.1	∞	0
草地	0.03	0.17	1.81	2.0	0.8	0.5
森林	0.5	0.16	1.81	2.0	0.8	0.7
水辺	0.001	0.05	-	-	1	-

り、各部門別に排出時間、排出形態（顕熱、潜熱）を操作することが可能である。また、本データベースはエネルギー消費プロセスを考慮した上で、積み上げベースの人工廃熱量を推計しているため、次報以降で都市熱環境改善策としての各種エネルギーシステム変更に伴う影響を定量的に把握することが可能である。なお、本研究ではデータベースが部門別に作成されている利点を活かし、図4に示すように交通部門については地表面の直上セルに、民生部門^{注3)}については建物屋上高さに位置するセルに、産業部門については煙突高さに位置するセルにそれぞれ廃熱位置を設定した。煙突高さに関しては、大阪市内の主要工場における煙突高さデータと各工場のエネルギー消費量データを用いて、エネルギー消費量に対する重み平平均値によって決定した。

2.6 計算条件

1) 広領域・風速の初期値は全領域で0m/sとした。温位の初期値は全領域で海面高さの地表面温位を300Kとし、鉛直プロファイルは温位勾配0.005K/mから決定した。比湿の初期値は、高さ2,000m以下は相対湿度50%、高さ2,000m以上は相対湿度20%とした。乱流量の初期値はlevel 2.0モデル¹⁰⁾から決定した。上端境界値は、各物理量ともに初期状態から変化しないと仮定した。側面境界値は全ての変数について勾配0とした。地表面境界値はMonin-Obukhovの相似則から求めた。

2) 狭領域・側面境界値は広領域の計算結果をone-wayネスティングすることで決定した。その他の条件は広領域と同様とした。

計算は8月の晴天日（快晴）を想定し、午前8時から2日間の計算を行い、後半1日分を計算結果として用いた。

3. 現況の再現を目的とした計算結果

筆者らは大阪府域の気候特性やその形成メカニズムを把握することを目的として、府内30点程度の公共気象データに関する解析や熱環境関連因子に関するデータベースの整備を行った¹⁷⁾。本節では、前節で説明した都市熱環境評価モデルを用いて大阪府域の気候特性に関する現況の再現を試みるが、その際にはこれらの結果や知見を再現のターゲットとして活用する。

3.1 計算メッシュサイズの違いや都市キャノピー形状および人工廃熱の考慮による再現精度の向上

図5に計算メッシュサイズの違いや都市キャノピー形状、人工廃熱の考慮に伴う再現精度の向上について、図中に示す各ケース間で比較した結果を示す。なお、対象地点は大阪市中央区（AMeDAS大阪局を含むメッシュ）とし、観測値にはAMeDAS大阪局の8月平均値を用いた。その結果、広領域計算（5kmメッシュ）であるために対象地点の地域特性が均されるCase1は他のケースと比較して非常に大きな誤差を生じた。また、狭領域計算（1kmメッシュ）のCase2に対して、都市キャノピー形状を考慮することによって日中の気温が低下し（Case3）、人工廃熱を考慮することによって夜間の気温が上昇し（Case4）、結果としてCase4が最も観測値に近い値を示した。従って、現況を精度良く再

現するためには、1km程度の詳細なメッシュに対して都市キャノピー形状や人工廃熱等の都市性状を再現することが不可欠と考えられる。なお、本論文の以降では、特に断りの無い限りCase4で計算を行った。

3.2 気温分布に関する再現結果

図6および7に大阪府公害監視センター管轄の大気汚染常時監視測定局測定データによる1995年から1999年の8月平均気温（晴天日のみを抽出）と計算モデルによる気温分布再現結果（地上高さ18m）との比較を示す。図6の夜間の結果に関して、観測データによると海水温の影響で気温が高い沿岸部と放射冷却が進み気温が低

図5 計算メッシュサイズの違いやキャノピー形状および人工廃熱の考慮による再現精度の向上（都心部：大阪市中央区）

図6 観測データ（左図）と計算結果（右図）の比較（夜間：3時）

図7 観測データ（左図）と計算結果（右図）の比較（日中：15時）

図8 都心部（大阪市東成区）および郊外部（富田林市）の気温日変動に関する再現結果

い内陸部の対比と、大阪市を中心としたヒートアイランド効果が重なった分布形状が確認されるが、計算結果においてもそれらの状況を良く再現している様子が伺える。図7の日中の結果に関しては、観測データによると海風の冷却効果による大阪湾沿岸部の低温域やそのコントラストとして示される内陸部の高温域が確認されるが、計算結果においてもそれらの状況を良く再現している様子が伺える。

図8に大阪府における都心部の代表点として大阪市東成区（測定局を含むメッシュ）、郊外部の代表点として富田林市（測定局を含むメッシュ）における気温日変動に関する観測値（先述と同様のデータ）と再現結果（地上高さ18m）の比較を示す。その結果、都心部および郊外部ともに、日平均値のみならず振幅や位相についても概ね良く再現する結果が得られた。

3.3 風系に関する再現結果

図9および10に、気温分布と同様の観測データ（8月の晴天日を対象）による大阪府内15点の風配図と計算モデルによる風系再現結果（地上高さ18m）との比較を示す。大阪府では年間の30%が典型的な海陸風日であり、気圧傾度風（メソスケール）と海陸風が混在する日を合わせると年間の約3分の2を占めている¹⁸⁾、この海風は午前中に大阪湾から各地の沿岸部に入る「局所海風」と、午後には太平洋から紀伊水道を通り大阪府全域に入る「広域海風」の2種類に分類されること明らかとなっている¹⁷⁾。図9の午前中の結果に関して、観測データによると各海岸線の法線方向に侵入する「局所海風」が確認されるが、計算結果においてもそれらの状況を良く再現している様子が伺える。図10の午後の結果に関しては、観測データによると太平洋から大阪府全域に侵入する「広域海風」が確認されるが、計算結果においてもそれらの状況を良く再現している様子が伺える。この「広域海風」は、大阪平野全体を広く支配している上に、風速も強く廃熱等の拡散に強い影響を持つことが予想されることから、人工廃熱が都市熱環境に及ぼす影響を検討する際には再現が不可欠と考えられる。

なお、結果は省略するが、夜間に大阪府域では陸風が卓越する

図9 観測データ（左図）と計算結果（右図）の比較（午前：11時）

図10 観測データ（左図）と計算結果（右図）の比較（午後：15時）

が、これらの空間分布や時間変動、さらには強度に関しても概ね良好な再現結果が得られた。

3.4 再現結果に関するまとめ

3.2および3.3の検討結果から示されるように、大阪府域の気候特性に関して現況の再現を試みた結果、気温分布および風系ともに概ね良く再現した。特に気温に関しては、複数点において日平均値のみならず振幅や位相についても良く再現した。都市気候シミュレーションを扱う既存研究は多数存在するが、例えば日平均気温との比較のみで良好な再現性が得られた（日変動の振幅や位相のずれは問題としない）と報告している事例も存在するように、対策手法の検討に重点を置くために、対象地域の気候特性に関する忠実な再現を重視した研究は少ないのが現状である。このような状況下で、複数の観測値を平均値のみならず振幅や位相に関して概ね再現していることは、人工廃熱の影響に関する検討や次報以降の改善策の効果推定を行う際の信頼性向上にも大いに寄与すると考えられる。

4. 人工廃熱が都市熱環境に与える影響

本節では、人工廃熱が都市熱環境に与える影響に関して、時空間特性などをより詳細に検討することを目的とし、人工廃熱データとして現況データを用いた場合と、一律廃熱条件の2通りの解析を試みた。

4.1 人工廃熱が気温に与える影響

まず、都心部（大阪市中心部）、臨海部（大阪市港区）、郊外部（富田林市）の各代表地点で人工廃熱量の地域特性に関して考察を行う。各代表地点の位置は図2を参照のこと。なお、各代表地点の人工

表3 太陽エネルギー起源の地表面熱負荷量と人工廃熱量の地域差^{注3)}

代表区分	位置	太陽エネルギー起源の地表面熱負荷 [W/m ²]						人工廃熱(民生・産業・交通部門のトータル) [W/m ²]					
		顕熱(日)	潜熱(日)	顕熱(15時)	潜熱(15時)	顕熱(3時)	潜熱(3時)	顕熱(日)	潜熱(日)	顕熱(15時)	潜熱(15時)	顕熱(3時)	潜熱(3時)
都心部	大阪市中央区	2,438	41	255	4	-2	0	2,241	2,390	161	210	26	5
臨海部	大阪市港区	2,839	217	301	23	-3	-1	1,408	529	60	25	50	19
郊外部	富田林市	2,444	623	253	67	-6	-4	102	43	5	3	2	0

表4 大気熱負荷量に占める人工廃熱の割合

代表区分	位置	全部門人工廃熱量/(太陽エネルギー起源の地表面熱負荷量+全部門人工廃熱量) [-]					
		顕熱(日)	潜熱(日)	顕熱(15時)	潜熱(15時)	顕熱(3時)	潜熱(3時)
都心部	大阪市中央区	0.48	0.98	0.39	0.98	1.06	1.03
臨海部	大阪市港区	0.33	0.71	0.16	0.53	1.05	1.04
郊外部	富田林市	0.04	0.06	0.02	0.05	-0.37	-0.03

図11 人工廃熱の有無による気温差(左図:午前3時、右図:午後3時)

図12 人工廃熱による気温上昇に関する地域差

(都心部:大阪市中央区、臨海部:大阪市港区、郊外部:富田林市)

廃熱量や土地被覆は、対象メッシュ周辺のデータと比較して特異ではないことを予め確認している。表3に太陽エネルギー起源による地表面からの熱負荷と人工廃熱の各部門トータル値を、日積算、15時、3時のそれぞれに関して示す^{注3)}。都心部では日中の民生部門の廃熱量が非常に多く、事務所や商業施設の活動時間に合わせた廃熱特性を示している。但し、事務所等では中央熱源による空調方式を採用している建物の割合が多いことから(延べ床面積では)、民生部門の廃熱は顕熱よりも潜熱の割合が大きい特徴がある。臨海部に関しては、1日を通して産業部門の割合が高く、産業中心の廃熱特性を示す。産業部門の廃熱は潜熱よりも顕熱の割合が大きく、一日を通じてほぼ一定量が排出される。最後に郊外部に関して、廃熱量は都心部や臨海部と比較して非常に少ないが、その中でも夕方から夜間にかけての民生部門の廃熱量が多く、住宅の活動時間に合わせた廃熱特性を示している。住宅では個別空調方式を採用している建物の割合が多いことから、民生部門の廃熱は潜熱よりも顕熱の割合が大きい。

表4に各地域における人工廃熱の大気熱負荷量^{注4)}に占める割合を、日積算、15時、3時のそれぞれに関して示す。日中(15時)に関しては、3地区ともに1日の中で比較的廃熱量が多い時間帯であるが、日射により暖められた地表面からの熱負荷量がそれ以上に大きいので、人工廃熱が大気熱負荷に占める割合も相対的に小さい値を示す。但し、都心部については、顕熱のうち39%を人工廃熱が占めている(臨海部は16%、郊外部は2%)。一方で夜間には、臨海部

を除き、廃熱量自体は日中に比べてかなり少ない値を示すが、地表面からの熱負荷量も小さい値となるため、人工廃熱が大気熱負荷に占める割合は相対的に大きな値を示す。地域特性に関して日積算で比較すると、郊外部で人工廃熱が大気熱負荷に占める割合はほぼ0に等しいのに対し、臨海部や都心部では顕熱がそれぞれ33%と48%、潜熱がそれぞれ71%と98%とかなり高い値を示している。特に夜半遅くの時間帯には、郊外部では人工廃熱が少ないために大気が冷却されているのに対し、臨海部や都心部では人工廃熱が大気熱負荷に占める割合が100%以上とかなり高い値を示し、人工廃熱の影響が相対的に強まっている。

図11に人工廃熱を考慮した場合(全部門現状データ)と考慮しない場合(全部門廃熱無し)の気温差(地上高さ18m)に関する分布状況を示す。表3の結果から、日中は都心部と臨海部でかなり廃熱量が多い値を示すが、人工廃熱の影響による気温上昇は都心部で最高0.4°Cであり、気温上昇幅は非常に小さい結果を示した。一方で、夜間にはほぼ全域で日中に比べて絶対的な廃熱量は減少するが、都心部では人工廃熱の影響によって1.1°Cの上昇が確認された。なお、昇温域の地域特性としては、日中は海風の影響により、主に内陸部に向けて影響範囲(高温域)が広がっているのに対し、臨海部ではほとんど影響が確認されない。夜間は都心部を中心とした同心円状に影響範囲が広がっており、人工廃熱によるヒートアイランド形状が明瞭に形成されている。

図12に各代表地点における人工廃熱(全部門現状データ)によ

図 1-3 人工廃熱の有無が風系に与える影響（風向のみを表示）

(午前1時、左図：拡大範囲、中図：人工廃熱無し、右図：人工廃熱有り)

る気温上昇（全部門で人工廃熱を0とした場合からの）計算結果を示す。1日を通して郊外部、臨海部、都心部の順に、気温上昇幅が大きくなる傾向を示した。図1-1の結果と同様、日中においては、3地区とも気温上昇幅は小さく、特に15時から17時頃にかけ最も小さくなる。これは、人工廃熱が大気熱負荷に占める割合が小さいこと、大気不安定化や広域海風による上空への拡散効果が主要因として考えられる。一方で夜間は、表3の結果から廃熱の絶対量は日中にくらべてかなり少ないことがわかるが、人工廃熱による気温上昇幅は大きくなる。これは廃熱量が少ないものの大気熱負荷に占める割合が大きいことや、大気不安定化が要因として考えられる。

4.2 人工廃熱が風系に与える影響

図1-3に人工廃熱を考慮した場合（全部門現状データ）と考慮しない場合（全部門廃熱無し）の午前1時における風系の比較結果（地上高さ18m）を示す。なお、図1-3は風向のみをベクトルで表示している。人工廃熱を考慮しない場合には、左図に示す拡大範囲内の全域で陸風がすでに卓越しているのに対して、人工廃熱を考慮した場合には臨海部（大阪市港区周辺）で未だ陸風に変化せず、大阪市中心部に向かう収束帯が存在している。図1-4に臨海部（大阪市港区）における夜間の風系ベクトルの変化を示す。この地点では東向きの風向成分が発生した時点で陸風へ変化したことを示す。人工廃熱を考慮しない場合には午前1時の時点で陸風に変化しているのに対して、人工廃熱を考慮した場合には午前3時に変化しており、人工廃熱が臨海部における陸風変化時刻を遅らせていることを示している。大阪市の臨海部では、経年的に陸風に変化しない傾向に変化しつつあることが観測データから明らかとなっている¹⁷⁾、実際の状況下でも都市キャノピー密度の高い都心地区における人工廃熱排出が夜間大気を不安定化し、陸風への変化を妨げつつあるものと考えられる。

4.3 人工廃熱の影響に関する時間および地域特性

4.1および4.2の検討結果から、特に人工廃熱の影響は夜間に顕著になることが示唆された。4.1および4.2では、人工廃熱に関して全部門で現状データを用いてその影響を考察した。現状データを用いることで、より現実に近い特性の把握が可能となるが、廃熱量自体に時空間特性が存在することから、純粋に人工廃熱が気候特性に与える影響を把握することは難しい。そこで、廃熱量自体の特性を排除するために、大阪府域の全メッシュに対して24時間一律で

図 1-4 人工廃熱が陸風変化時刻に与える影響
(臨海部：大阪市港区)

等量の人工廃熱を与えた場合（以下一律廃熱）の計算を行った。

設定条件に関して、各メッシュにおいて 12W/m^2 の顕熱を与え続けるものとし、廃熱位置は地表面とした。ここで設定した廃熱量 12W/m^2 は大阪府内全メッシュの時空間平均廃熱量 (10.8W/m^2) にほぼ近い値である。

図1-5に都心部（大阪市中央区）、臨海部（大阪市港区）、郊外部（富田林市）における一律廃熱ケースと廃熱無しの場合の気温差を示す。図1-5の結果から、3地点ともに人工廃熱による気温上昇は日中の16時頃に最小値、夜間の5時頃に最大値を示している。図1-2の現状データを考慮した場合の計算結果では、最大値を示すのが24時頃であったのに比べて、4、5時間遅く、最大値も大きい値を示している。現状データを用いた場合に24時頃ピークを示すのは、24時から早朝にかけての人工廃熱の絶対量が少ないためであ

図 1-5 一律廃熱時の気温上昇に関する地域特性
(都心部：大阪市中央区、臨海部：大阪市港区、郊外部：富田林市)

図16 廃熱量の増加が気温上昇に及ぼす影響
(都心部：大阪市中央区)

る。地域特性に関して、都心部と臨海部はほぼ同じ傾向を示しているが、郊外部では大きく異なる傾向を示した。郊外部では、夕方から夜間にかけての気温上昇幅が増加する時間帯が2時間ほど早く、気温差の上昇が21時に緩やかになり、その最大値も他の2地点よりかなり低い値を示した。気温上昇幅が増加する時刻が早いのは、郊外部が山地に近い場所に位置することから、大気安定化が都心部や臨海部よりも早いことが要因と考えられる。一方、気温差の最大値が小さいのは、周辺山地から斜面下降流が吹き込み、人工廃熱による大気加熱を抑制していることが要因と考えられる。

図16に一律廃熱時の廃熱量を毎時0W/m²、12W/m²、24W/m²、36W/m²、48W/m²に変化させた場合の都心部（大阪市中央区）における気温上昇幅の変化状況を示す。各時刻において廃熱量（一律廃熱）が増加するに連れて、廃熱無しからの気温上昇幅は増加している。しかし、その増加の様子は大きく日中と夜間で異なる。日中には廃熱量の増加に対する気温上昇の傾きが非常に小さい。それに対して、夜間には深夜ほど廃熱量に対する気温上昇の傾きが大きくなる傾向が認められる。なお、廃熱無しと廃熱量12W/m²との間の増加幅が最も大きく、廃熱量が増加するに連れて徐々に気温上昇幅が緩やかになる傾向を示した。

次に、人工廃熱の排出時間帯を日中（6時から17時）と夜間（18時から5時）に分離し、日中および夜間のみの廃熱がそれぞれ気温に与える影響について検討を行った。なお、廃熱量は24時間一律で12W/m²を与えた。図17に都心部（大阪市中央区）における廃熱無し条件との気温差を示す。各廃熱時間帯の気温上昇幅に注目すると、4.1や4.3の結果と同様に、夜間には日中よりも最大で10倍程度大きい値を示した。さらに各々の条件で廃熱を停止している時間帯に着目すると、日中廃熱の場合には廃熱停止時間帯（夜間）の気温上昇がごくわずかであるのに対して、夜間廃熱の場合は午前5時に廃熱を停止しているにも関わらず、人工廃熱の排出停止後から正午過ぎにかけて気温上昇が確認されている。以上の結果から、夜間廃熱は夜間気温を大きく上昇させるだけでなく、午前中にもその影響を引きずることが明らかとなった。

図17 日中および夜間廃熱条件と廃熱無し条件との気温差
(都心部：大阪市中央区)

図18 廃熱無しの範囲を拡大した条件と全域廃熱無し条件との気温差
(都心部：大阪市中央区)

4.4 人工廃熱の有効対策範囲に関する一考察

ヒートアイランド現象に対する改善策を検討する際には、人工廃熱に限らず、有効な対策範囲を予め検討しておく必要がある。そこで本節では、対策範囲の影響を検討することを目的として、あるメッシュの廃熱を全部門で無しとした場合と大阪府全域で廃熱を無しとした場合を比較し、廃熱0メッシュ範囲を拡大した時の中心メッシュにおける気温低減度について検討した。対象地区は都心部（大阪市中央区）とし、廃熱を0とする範囲を1km四方メッシュから、それを中心とした3km四方メッシュ、9km四方メッシュに拡大した。なお、廃熱0メッシュ以外の廃熱データには各部門で現状データを使用した。図18に結果を示す。1km四方で廃熱を0とした場合には大阪府全域で廃熱した結果とほぼ同じ値を示しており、廃熱削減効果がほとんど認められないが、廃熱0メッシュを3km四方や9km四方に拡大することによって、気温低下幅は増大し、大阪府全域で廃熱を0とした条件に徐々に近づくことがわかる。但し、日中に関しては、9km四方条件でほぼ全域廃熱無しの気温に近づくのに対して、夜間には9km四方条件でも全域廃熱有りとした場合の6割程度の低減効果にとどまっている。これより、日中と夜間では周囲から受ける人工廃熱の影響の強さが異なっており、特に夜間には周囲から受ける影響が強く、かつその影響範囲も大きいことがわかる。

以上の結果から、人工廃熱に関して、局所的な対策による対策地域の熱環境改善は非常に困難であり、各市町村間の協力を必要とす

る広域的対策が必要であることが示された。また、周囲からの影響を強く受けることから、緩和対策の効果を検討するためには3次元計算が必要不可欠と考えられる。

5. 結論

本報では、筆者らが既報⁶⁾で作成したエネルギー環境データベースを都市熱環境評価モデル⁷⁾の地表面境界条件として使用することによって、都市における人工廃熱が都市熱環境に及ぼす影響に関して検討を行った。以下に本論文の検討結果から得られた知見を示す。

- 1) 大阪府域の気候特性に関して現況の再現を試みた結果、気温分布および風系とともに概ね良く再現した。特に気温に関しては、複数点において振幅や位相についても良く再現した。
- 2) 気候特性を精度良く再現するためには、1km程度の詳細なメッシュに対して、都市キャノピー形状や人工廃熱などの都市性状を再現することが不可欠である。
- 3) 現況データを用いて人工廃熱が気温に及ぼす影響を検討した結果、夜間には日中と比較して廃熱量が減少するものの、気温上昇幅は3倍近い値を示した。また、昇温域に関しても昼夜で明確な違いが認められた。
- 4) 現況データを用いて人工廃熱が風系に及ぼす影響を検討した結果、特に臨海部では人工廃熱の影響により陸風変化時刻が遅くなることを示した。
- 5) 一律廃熱条件で人工廃熱の影響に関する時間特性を検討した結果、最も気温に影響を及ぼす時間帯は夜明け前であった。
- 6) 夜間における人工廃熱は夜間気温を大きく上昇させるだけではなく、午前中にもその影響を引きずることを示した。
- 7) 人工廃熱の有効対策範囲について検討した結果、特に夜間には周囲からの影響が強く、かつその影響範囲も大きいことから、都市熱環境の改善には広域的対策が不可欠である。

【謝辞】

本研究の遂行に当たり、関係行政機関より多大なるご協力を頂いた。また、本研究は平成13年度文部科学省科学研究費補助金（奨励研究A、研究代表者：鳴海大典、課題番号12750529）の助成を受けた。記して謝意を表する。

【注記】

- 1)冒頭で解説したように、環境省で「ヒートアイランド対策検討委員会」が設置されるなど、国家プロジェクトとしてヒートアイランド現象に対する改善指針を検討する段階に来ているが、例えば年間トータルの空調用エネルギー消費量がヒートアイランド現象によって減少することを報告している文献¹⁹⁾もあるように、ヒートアイランド現象が人体や生態系、資源消費などに及ぼす影響については、未だ総合的な整理がなされていない。
- 2)広域海風を再現するためには、広領域内に太平洋や紀伊水道を含めることに

加え、小領域の範囲が大きくなる場合には、小領域内にも紀伊水道を含める必要があることを確認している。

3)本論文では、建物の人工廃熱を建物外部からの侵入熱と建物内部発熱を加算したもの、すなわち冷房負荷に、空調用エネルギー消費量を加算したものと定義しており、外壁面から周囲大気への対流熱や外壁面からの長波放射、反射日射等は建物の人工廃熱に含まない。但し、これらの熱移動計算は都市熱環境評価モデル上で別途行っている。従って、表3において、後者の建物表面から周辺環境への熱流については、太陽エネルギー起源の地表面熱負荷として取り扱っている。

4)本論文では、大気熱負荷量を太陽エネルギー起源の地表面から大気への熱負荷量と各部門（民生・産業・交通）の人工廃熱量を合計した値と定義している。

【参考文献】

- 1)環境省：平成12年度 ヒートアイランド現象の実態解析と対策のあり方について報告書、2001
- 2)尾島俊雄：熱くなる大都市、NHKブックス、1975
- 3)下田吉之・水野稔・亀谷茂樹・百瀬敏成・金地孝行：都市未利用エネルギーの活用可能性評価手法に関する研究、空気調和衛生工学会論文集、No. 61, pp. 67-77、1996. 4
- 4)亀谷茂樹・水野稔・下田吉之・葛原浩美、西隆良：空調システムをもつ建物からの熱環境負荷に関する研究、空気調和衛生工学会論文集、No. 62, pp. 1-11、1996. 7
- 5)亀谷茂樹・水野稔・下田吉之：空調設備の年代推移と都市熱環境負荷の変化の推移、空気調和衛生工学会論文集、No. 67, pp. 13-21、1997. 10
- 6)下田吉之・高原洋介・亀谷茂樹・鳴海大典・水野稔：大阪府におけるエネルギーフローの推定と評価-都市における物質・エネルギー代謝と建築の位置付けその2-、日本建築学会計画系論文集、No. 555, pp. 99-106、2002. 5
- 7)近藤明・加賀昭和・山口克人・合田恵理子・水間健二：数値モデルによる地域開発の微気象影響評価、空気調和衛生工学会論文集、No. 83, pp. 1-9、2001. 10
- 8)呉銀珠・近藤明・山口克人・水間健二：地域開発スケールの流れ場の日変動シミュレーション、空気調和衛生工学会論文集、No. 76, pp. 29-39、2000. 1
- 9)Businger, J.A., J.C. Wyngaard, Y. Izumi and E.F. Bradley: Flux Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer, J. Atmos. Sci., 28, pp. 181-189, 1971
- 10)Mellor, G.L. and T. Yamada: Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems, Rev. Geophys. Space Phys., 20, pp. 851-875, 1982
- 11)Deardorff, J.W.: Efficient Prediction of Ground Surface Temperature and Moisture with Inclusion of a Layer of Vegetation, J. Geophys. Res., 83, pp. 1889-1903, 1978
- 12)Acs F., D.T. Mihailovicar and B. Rajkovic: A Coupled Soil Moisture and a Surface Temperature Prediction Model, J. Appl. Meteor., 30, pp. 8212-8228, 1991
- 13)近藤裕昭：人間空間の気象学、朝倉書店、2001年
- 14)一ノ瀬俊明、下堂園和宏・鶴野伊津志・花木啓祐：細密数値情報に基づく都市気候数値シミュレーション地表面境界条件の高精度化、天気、No. 44, pp. 785-797、1997年
- 15)村上周三・持田灯・金相進・大岡龍三：関東地方における土地利用状況の変化と流れ場・温度場の関係-Mellor・Yamada型の都市気候モデルによる局地気象解析-、日本建築学会計画系論文集、No. 491, pp. 31-39、1997年
- 16)A. Kondo, M. Ueno, A. Kaga and K. Yamaguchi: The Influence of urban Canopy Configuration on Net Radiation, Boundary-Layer Meteor., 100, pp. 225-242, 2001
- 17)日本建築学会編著(筆者ら共著)：都市環境のクリマアトラス-気候情報を活かした都市づくり-、(株)ぎょうせい、2000
- 18)Mitsuo Mizuma: General Aspects of Land and Sea Breezes in Osaka Bay and Surrounding Area, Journal of the Meteorological Society of Japan, No. 73-6, pp. 1029-1040, 1995
- 19)平野勇二郎・茅陽一・柴崎亮介：都市ヒートアイランド現象の空調・給湯エネルギー消費への影響評価、土木学会論文集、629, pp. 83-96、1999. 8

(2002年5月10日原稿受理、2002年9月25日採用決定)