

人工排熱の排出特性が都市熱環境の再現に及ぼす影響 - 京阪神地域を対象とする感度分析 -

Sensitivity Analysis in Urban Climate Simulation Model to Determin Parametars that Strongly
Influence on the Simulation Accuracy
- A case study around the Keihanshin district -

照井 奈都 *¹ 鳴海 大典 *¹ 下田 吉之 *¹
1st Natsu TERUI 2nd Daisuke NARUMI 3rd Yoshiyuki SHIMODA

*¹ 大阪大学 Division of Sustainable Energy and Environmental Engineering, Osaka University

Corresponding author: Natsu TERUI, narumi-d@see.eng.osaka-u.ac.jp

ABSTRACT

In order to develop measures that effectively mitigate urban heat island phenomenon, a simulation model capable of predicting urban thermal climate precisely must be developed. This paper analyzes sensitivity of estimated air temperature in a meso-scale climate model to how anthropogenic heat is released. The result showed that the total amount of heat release from the residential, transportation and industrial sectors, the pattern of heat release from the residential and industrial sectors, the height of the industrial sector have a significant influence on air temperature during night and early morning while atmosphere is stable.

キーワード：ヒートアイランド, 人工排熱, 感度分析, 現況再現

Key Words : Urban heat island, Anthropogenic heat, Sensitivity analysis, Reproduction

1. はじめに

ヒートアイランド現象は都市被覆の人工化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その時空間特性が決定される。尾島⁽¹⁾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排熱)」に分類し、それらの相乗作用により都市熱環境が悪化すると述べている。これら両者の影響を分析することを目的として、メソスケール数値解析手法を用いた多くの検討が工学や気象学分野を中心に行われている⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

前者の一次破壊系要因に関する影響について分析を行う場合は、主として国土数値情報などの土地利用データを基に被覆状況を表現することが一般的である。関連研究としては村上⁽⁵⁾や佐藤⁽⁶⁾が挙げられる。例えば国土数値情報は、時間としては昭和51年から現在にかけて概ね5年か

ら10年間隔で、空間としては日本全国のデータが標準地域3次メッシュで入手可能であり、その影響を分析することはそれほど労を必要としない。

後者の二次破壊系要因に関する影響について分析を行う場合は、民生部門に関しては建物用途別の延床面積を基本データとして、交通部門に関しては交通量を基本データとして、産業部門に関しては大規模事業所におけるエネルギー消費量を基本データとして、それぞれ人工排熱量を推計することが一般的である。ここで、特に民生部門に関しては、建物用途別の建築ストック(延床面積)に関する情報に加え、排熱機器の効率や建物用途別ストック比率など様々な情報を必要とする。延床面積は地方自治体等で整理している統計情報を基にデータを整備することが一般的であるが、空間分布情報として建物用途別に延床面積等を整理している機関(多くの場合は行政機関)は稀であり、多くの場合研究者が独自にデータを入手し、様々な工夫を施して建築ストックに関する空間分布情報を作成しているの

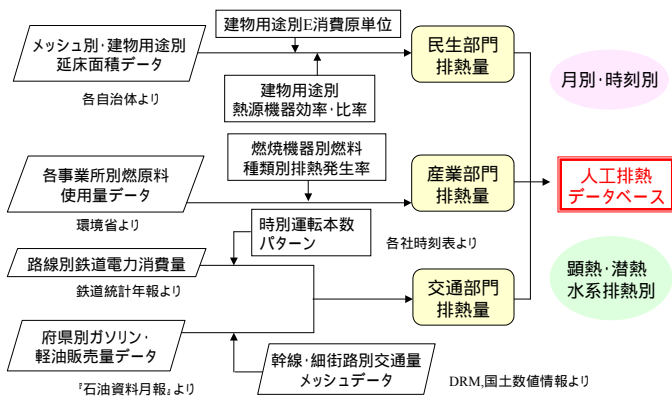


図1 人工排熱データベースの整備方法

が現状である。このような検討を行った事例として一ノ瀬ら⁽⁷⁾や足永ら⁽⁸⁾、筆者ら⁽⁹⁾が挙げられる。このうち、筆者らは排熱形態の分離(顕熱・潜熱・水系)・排出時間の考慮、部門別データ(民生・産業・交通)の必要性に配慮した上で、近畿圏を対象とする人工排熱データベースを作成してきた⁽¹⁰⁾。この人工排熱データベースでは都市における人工排熱量を可能な限り詳細に推計するために多くのパラメータに関する情報を整備しているが、パラメータの中には整備に多大な労を要するものや、何らかの根拠を基にした仮定に頼らざるを得ないものも存在するのが実情である。

以上の背景から、将来的に様々な地区や年度(将来予測も含め)を対象として人工排熱データベースを整備し、都市熱環境影響を評価していくにあたり、都市熱環境に強い影響を及ぼすパラメータを事前に把握し、影響力の強いパラメータを詳細かつ優先的に整備していくなど、人工排熱データベースを構築していく上での注意事項を知見として整理することは有益と考えられる。そこで本研究では、大阪府を中心とした京阪神地域を対象に、メソスケール数値解析モデルの地表面境界条件となる人工排熱データベースの設定条件に関して感度解析を行うことによって、人工排熱の排出特性が都市熱環境の再現状況に及ぼす影響について基礎的な検討を試みた。本論文では、筆者らが近畿圏を

表1 機器効率・排熱比率・構成比率(業務)

	電動ターボ冷凍機	空冷ヒートポンプ	吸収式冷凍機	
機器COP	3.3	2.8	1.2	
顕熱排熱発生率 ^(注3)	0.12	1.00	0.11	
潜熱排熱発生率 ^(注3)	0.88	0.00	0.89	
機器比率	商業	0.64	0.13	0.23
	事務所	0.37	0.31	0.33
	遊興娯楽	0.19	0.25	0.56
	宿泊施設	0.21	0.13	0.66
	文教施設	0.19	0.25	0.56
	学校	0.05	0.40	0.56
	大規模病院	0.25	0.29	0.47
	医療厚生	0.25	0.29	0.47
庁舎建築	0.67	0.11	0.19	

対象として整備している人工排熱データベースの概要を示し、メソスケール数値解析モデル⁽¹¹⁾を用いて気温分布の再現や各部門別の人工排熱に関する影響評価を行った上で、人工排熱の排出特性に関する感度解析を行うことによって各パラメータの有する影響程度について検討した。

2. 人工排熱データベースの概要

筆者らは民生部門・産業部門・交通部門の各部門別エネルギー消費量を基にして、排熱形態別および月・時刻別に第3次地域標準メッシュ(約1km四方)単位で近畿圏全域の人工排熱データベースを整備している⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾。図1に整備方法の全体概要を示す。また、以下に部門毎の整備方法について概要を述べる^(注1)。

2.1 民生部門

民生部門の人工排熱は、主として住宅や業務建物などで消費されるエネルギーに起因するものである^(注2)。人工排熱データベースでは標準地域3次メッシュ毎の建物用途別排熱需要量を延床面積データならびにエネルギー消費原単位から推計し、建物用途別熱源機器比率や機器効率などを基にメッシュ毎の排熱量を算出している。なお、エネルギー

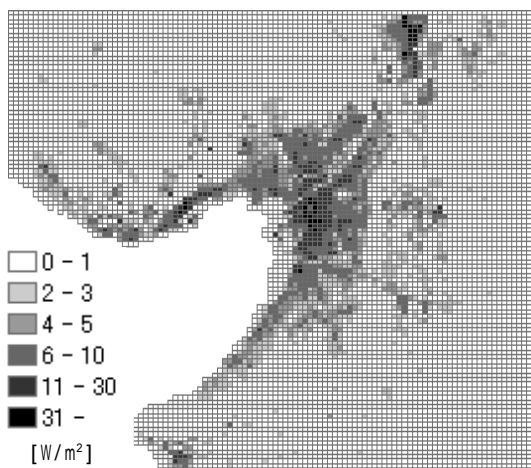


図2 民生部門顕熱排熱量(8月14時)

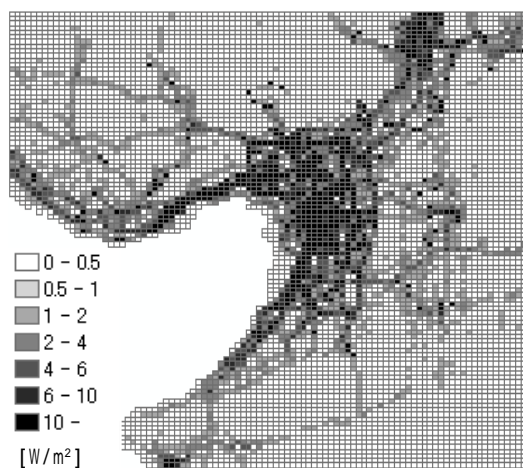


図3 交通部門顕熱排熱量(8月14時)

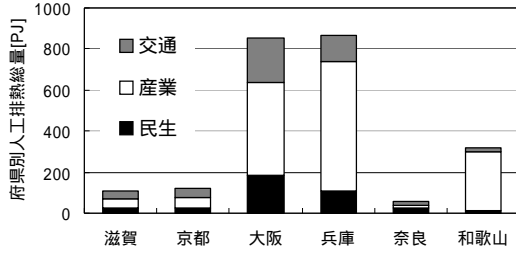


図4 各府県別の人工排熱総量(部門別年間総量)

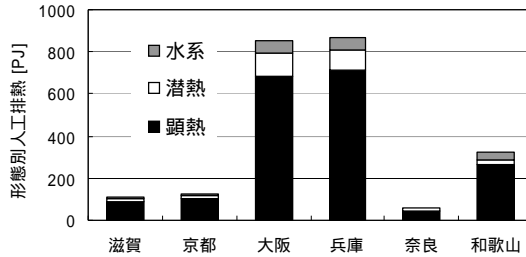


図5 各府県別の人工排熱総量(排熱形態別年間総量)

消費原単位や機器比率などは関西地区建物エネルギー消費実態調査⁽¹⁴⁾の結果を参考に設定している。計算に用いた業務部門の機器効率・排熱発生率^(注3)・建物用途別機器構成比率は表1にそれぞれ示すとおりである。データベースの一例として、8月の14時における顕熱排熱の空間分布(狭領域)を図2に示す。

2.2 産業部門

産業部門の人工排熱は、主として工場や発電所などで消費されるエネルギーに起因するものである。人工排熱データベースでは環境省の大気汚染物質排出量総合調査⁽¹⁵⁾に記載されている燃原料使用量データを基に、燃焼機器別・燃料種類別の排熱発生率から第3次メッシュ毎の人工排熱量を算出している^(注4)。

2.3 交通部門

交通部門の人工排熱は、主として自動車や鉄道などで消費されるエネルギーに起因するものである。人工排熱データベースでは、このうち鉄道については、鉄道統計年報⁽¹⁶⁾に記載されている路線別鉄道電力消費量と平均的な鉄道運行パターンより第3次メッシュ毎の人工排熱量を算出している。自動車については、石油資料月報⁽¹⁷⁾に記載されている府県別ガソリン・軽油販売量を第3次メッシュ毎に整備した幹線・細街路別交通量データ⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾で按分することによりメッシュ毎の人工排熱量を算出している。データベースの一例として、8月の14時における顕熱排熱の空間分布(狭領域)を図3に示す。

2.4 近畿圏の人工排熱全体像

近畿圏の府県別に集計した人工排熱の部門別内訳を図4に、排熱形態別内訳を図5に示す。いずれも年間積算の排出量を示している。部門別の結果から、臨海部に工業地帯

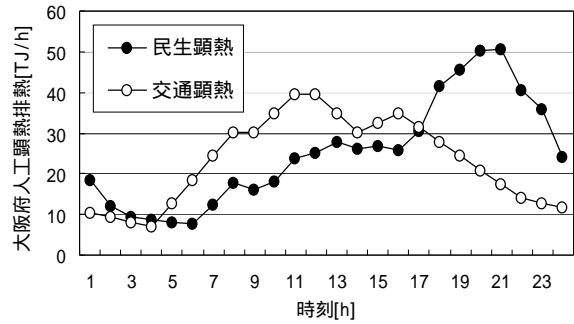


図6 大阪府域の民生・交通顕熱排熱の日変化(8月)

表2 計算領域の概要

	計算領域 [km]	grid数	gridサイズ
広領域	196 × 372	42,180個 [38 × 74 × 15]	5km
狭領域	100 × 100	150,000個 [100 × 100 × 15]	1km

表3 人工排熱の排出位置

部門	排出項目	排出位置
民生部門	空調(空冷ヒートポンプ)	各階均等
	空調(電動ターボ冷凍機)	屋上階
	空調(吸収式冷凍機)	屋上階
	空調(熱取得) ^(注7)	各階均等
	給湯	各階均等
交通部門	自動車	地上第1層
	鉄道	地上第1層
産業部門	全	煙突高さ

を有する兵庫県や大阪府、和歌山県に多くの産業排熱が存在することや、大阪府や兵庫県では民生・交通排熱が突出して存在することがわかる。これらに対して、滋賀県や京都府、奈良県では排熱量が比較的少ないことがわかる。排熱形態別の結果から、産業排熱や交通排熱、民生部門のうち住宅からの排熱が多い府県では全体的に顕熱の割合が多くなる一方で、業務建物からの排熱が多い府県では潜熱の割合も大きくなる特徴がある。図6に大阪府における民生および交通部門の人工顕熱排熱の日変化(8月)を示す。民生部門の顕熱は、昼間は主として業務建物から、夜間は主として住宅から放出され、図6はそれらの特徴が混じった時間特性を示している^(注5)。交通排熱は交通量の多い昼間を中心に放熱されている。

3 計算モデルの概要

本章以降では、2章で紹介した近畿圏を対象とする人工排熱データベース⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾を用いて都市熱環境の数値シミュレーションを行い、都市における人工排熱がヒートアイランド現象(都市熱環境)に及ぼす影響や人工排熱の種々設定条件(排出特性)が都市熱環境の再現状況に及ぼす影響について検討した結果を紹介する。本章では、以下に計算モデルの概要を述べる。

本研究で用いるメソスケール数値解析モデル⁽¹¹⁾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

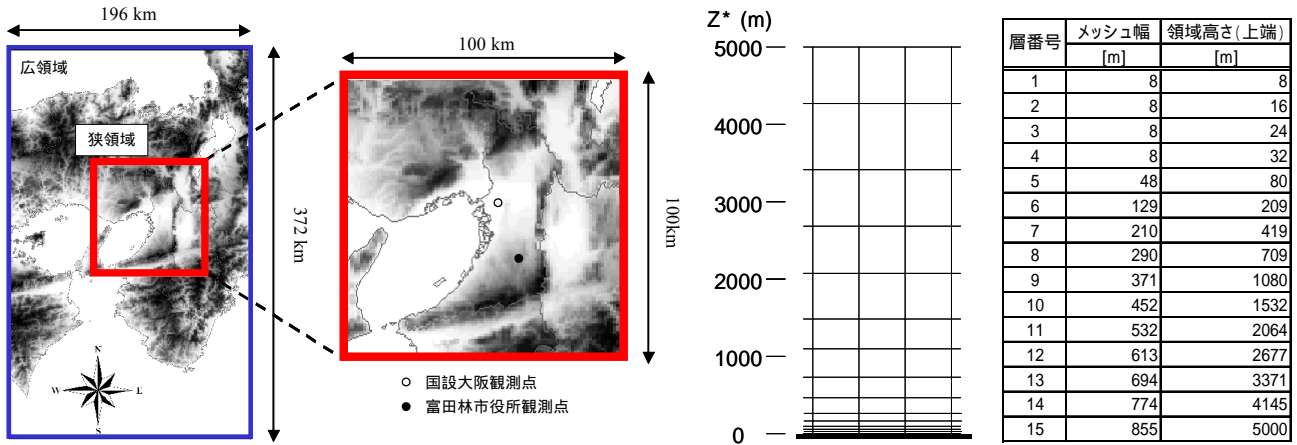


図7 計算領域(左:水平方向、右:鉛直方向)

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。計算領域は、図7に示す紀伊水道を含む全体領域(広領域)内に小領域(狭領域)を設定し、両領域をone-wayネスティング手法で結合した。表2に計算領域や計算メッシュ数などの概要を領域別に示す。人工排熱に関しては2章で紹介した近畿圏人工排熱データベースを用い、時刻別・部門別・形態別(水系は除く)に各計算メッシュに付加した^(注6)。なお、人工排熱の付加位置は、4章では部門別に表3に示す位置に設定した。計算は8月の晴天日(快晴)を想定した。なお、境界条件や初期条件、土地利用条件などの計算方法の詳細は鳴海ら⁽⁹⁾を参照されたい。

4. 人工排熱が気温分布に与える影響

4.1 気温分布の再現精度に関する評価

現況の再現結果として、全部門の人工排熱を考慮した場合(全部門現状データ:ベースライン条件)の、狭領域内の14時と2時における気温分布予測結果を図8に示す。また、図9に気温予測結果に関する計算値と観測値の比較を、大阪府の都心部(大気汚染常時監視測定局国設大阪観測点を含む計算メッシュ)と郊外部(大気汚染常時監視測定局富田林市役所観測点を含む計算メッシュ)について示す。なお、それぞれの位置は図7中に示している。観測値には上述した大気汚染常時監視測定データの2000年から2003

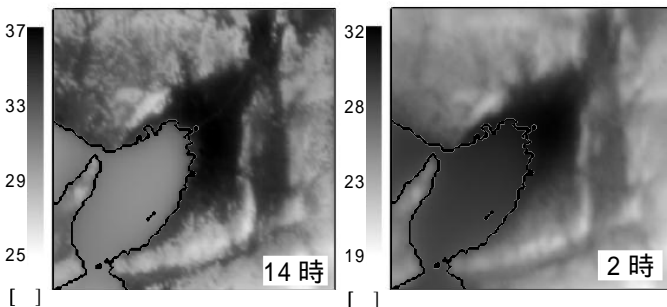


図8 狭領域内の現況気温分布予測結果

年の8月を対象に海陸風が卓越している日のみを抽出した平均値を用い、各時刻別に標準偏差も併せて示した^(注8)。比較結果について、日平均値のみならず位相や振幅とも良好な結果が得られている。

4.2 部門別人工排熱が気温分布に与える影響

(1) 民生排熱の影響

図10に民生部門の人工排熱を考慮した場合(ベースライン条件)と考慮しない場合(民生部門のみ排熱無し)の気温差(14時および2時)に関する狭領域内の分布状況を示す。図6の結果から分かるように、民生顕熱排熱は14時と比較して2時には概ね半減するにも関わらず、大阪の中心部における気温影響に関しては、14時には0.3程度であるのに対して、2時には0.8程度に達している。これは、夜間には大気が安定化するために、排熱の上空拡散が抑制されることによるものである。なお、夜間の昇温域に関する地域特性としては、概ね大阪市を中心として影響範囲が

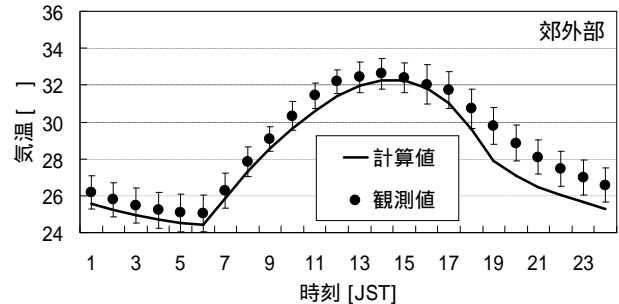
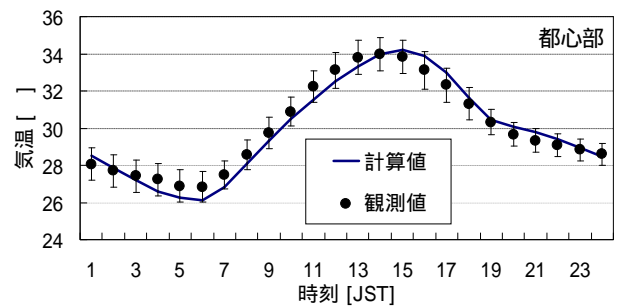


図9 気温予測結果に関する計算値と観測値の比較

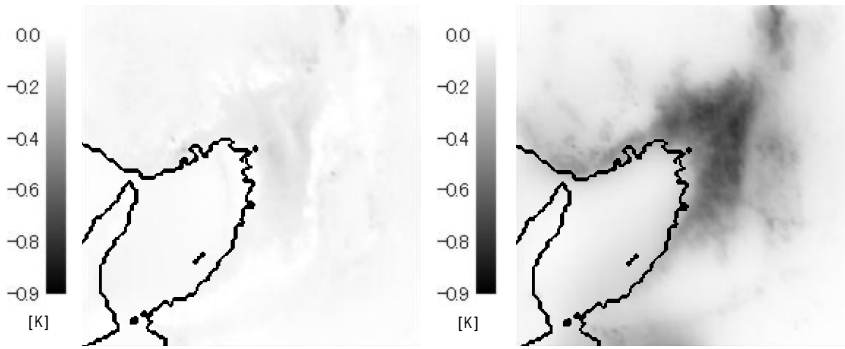


図 1 0 民生排熱の有無による気温差 (左:14時、右:2時)

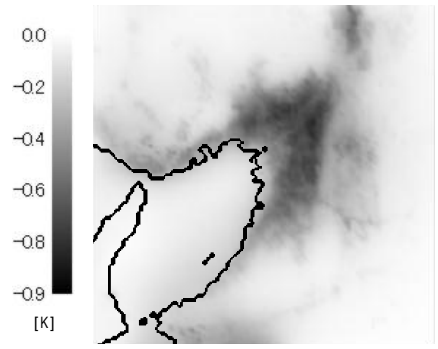


図 1 1 民生排熱 (住宅)の有無による気温差 (2時)

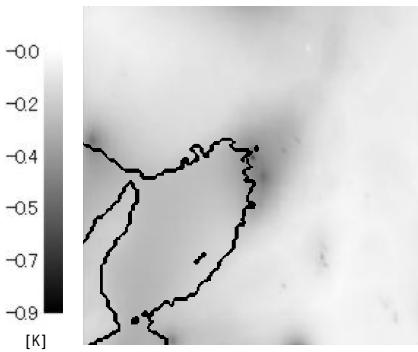


図 1 2 産業排熱の有無による気温差 (2時)

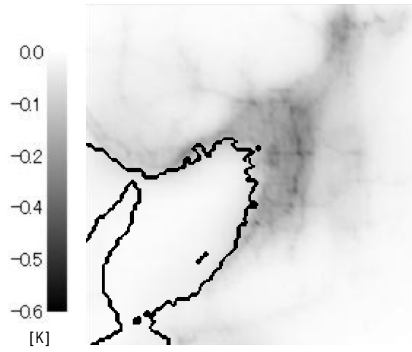


図 1 3 交通排熱の有無による気温差 (2時)

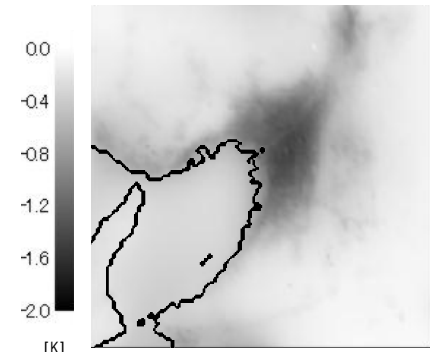


図 1 4 全部門排熱の有無による気温差 (2時)

広く郊外までに拡大しており、人工排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ことが確認された。図 1 1 に民生部門のうち住宅の人工排熱を考慮した場合 (ベースライン条件) と考慮しない場合 (住宅のみ排熱無し) の気温差 (2 時) に関する狭領域内の分布状況を示す。図 1 1 と図 1 0 を比較すると、2 時には

両者に明確な違いが認められないことから、この時間帯の民生排熱による気温影響はそのほとんどが住宅起因によるものであり、業務建物の影響は小さいことがわかる。

(2) 産業排熱の影響

図 1 2 に産業部門の人工排熱を考慮した場合 (ベースライン条件) と考慮しない場合 (産業部門のみ排熱無し) の気温差 (2 時) に関する狭領域内の分布状況を示す。産業排熱の排出位置は、表 3 に示すような煙突高さに設定されている。そのため、特に大阪府や兵庫県では産業排熱の総量が多いにも関わらず (図 4) 地上付近の気温分布に及ぼす影響は相対的に小さく、2 時には最高値が 0.4 弱にとどまった。

(3) 交通排熱の影響

図 1 3 に交通部門の人工排熱を考慮した場合 (ベースラ

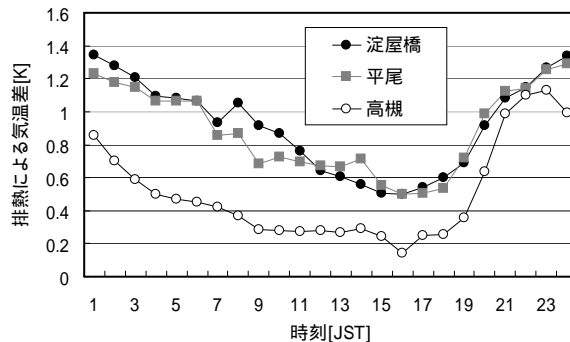


図 1 5 全部門排熱の有無による気温差の日変化 (都心部: 淀屋橋、臨海部: 平尾、郊外部: 高槻)

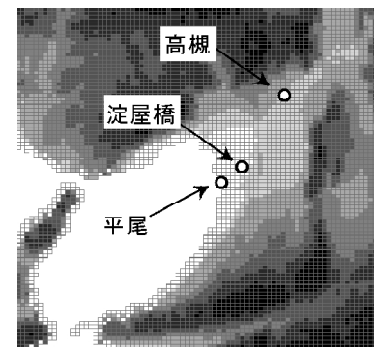


図 1 6 気温考察の固定点

イン条件) と考慮しない場合 (交通部門のみ排熱無し) の気温差 (2 時) に関する狭領域内の分布状況を示す。また、図 6 に交通部門の人工顕熱排熱の日変化 (8 月: 大阪府) を示す。大阪の中心部における気温影響に関しては、14 時には 0.2 程度であるのに対して (図は省略) 2 時には 0.4 程度に増加しており、昼夜の影響程度の変化は民生部門と同様の傾向を示した。夜間の昇温域に関する地域特性としては、交通排熱の影響を受ける地域は狭領域の全体に広く及び、特に影響を大きく受ける地域が主要幹線道路沿いの局所に見受けられた。

(4) 全部門排熱の影響

図 1 4 に全部門の人工排熱を考慮した場合 (ベースライン条件) と考慮しない場合 (全部門排熱無し) の気温差 (2 時) に関する狭領域内の分布状況を、図 1 5 に代表地点に

表 4 感度解析における分析項目

部門	項目	条件	感度解析における設定条件の内容	ベースライン条件
民生業務部門	排出総量	条件(1)	0%排出	100%排出
		条件(2)	50%排出	
	排出時間パターン	条件(1)	8-18時に一定量を継続排出(総量は変わらず)	関西地区建物エネルギー消費実態調査 ⁽¹⁴⁾
		条件(2)	8-22時に一定量を継続排出(総量は変わらず)	
		条件(3)	業務地区における電力供給実績から作成した時間変化 ⁽²⁰⁾	
	排出鉛直位置	条件(1)	地上第1層(0-8m)において排出	建物各階もしくは屋上
冷房機器比率	条件(1)	空冷ヒートポンプの比率を倍増(電動ターボおよび吸収式を削減)	関西地区建物エネルギー消費実態調査 ⁽¹⁴⁾	
	条件(2)	空冷ヒートポンプの比率を100%		
民生住宅部門	排出総量	条件(1)	0%排出	100%排出
		条件(2)	50%排出	
	排出時間パターン	条件(1)	0-24時に一定量を継続排出(総量は変わらず)	関西地区建物エネルギー消費実態調査 ⁽¹⁴⁾
		条件(2)	住宅地区における電力供給実績から作成した時間変化 ⁽²⁰⁾	
排出鉛直位置	条件(1)	地上第1層(0-8m)において排出	建物各階	
交通部門	排出総量	条件(1)	全0%排出	全100%排出
		条件(2)	全50%排出	
		条件(3)	細街路のみ0%排出(幹線道路は変わらず)	
		条件(4)	幹線道路のみ0%排出(細街路は変わらず)	
		条件(5)	鉄道のみ0%排出	
	排出時間パターン	条件(1)	国土交通省・環境省の設定 ⁽²¹⁾	筆者らの設定 ⁽⁹⁾
産業部門	排出総量	条件(1)	0%排出	100%排出
		条件(2)	50%排出	
	排出時間パターン	条件(1)	0-24時に一定量を継続排出(総量は変わらず)	国土交通省・環境省 ⁽²¹⁾
	排出鉛直位置	条件(1)	地上第1層(0-8m)において排出	煙突毎に設定
条件(2)		地上第6層(81-209m)において排出(全煙突の重み平均)		

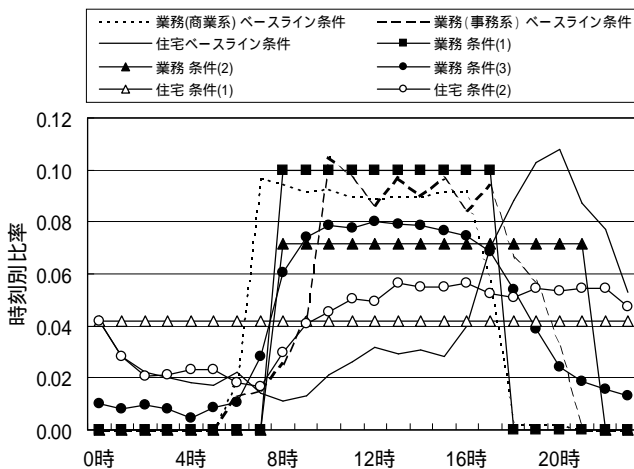


図 1 7 民生部門排出時間パターン

おける気温差の日変化を示す。代表地点には、都心部、臨海部、郊外部の代表としてそれぞれ図 1 6 中に示す「淀屋橋」、「平尾」、「高槻」の3地点を選定した。図 1 5 の結果から、都心部や臨海部では昼間には0.6 程度、夜間には最大1.4 程度の気温影響が確認された。これに対して郊外部では昼間の影響は小さく0.2 程度である一方で、夜間には影響が強まり、特に22時頃には都心部とほぼ同程度(1.2)の影響が確認された。

5 .人工排熱の排出特性に関する感度分析

4 章では筆者らが整備した人工排熱データベースをメソスケール数値解析モデルの地表面境界条件として用い、京

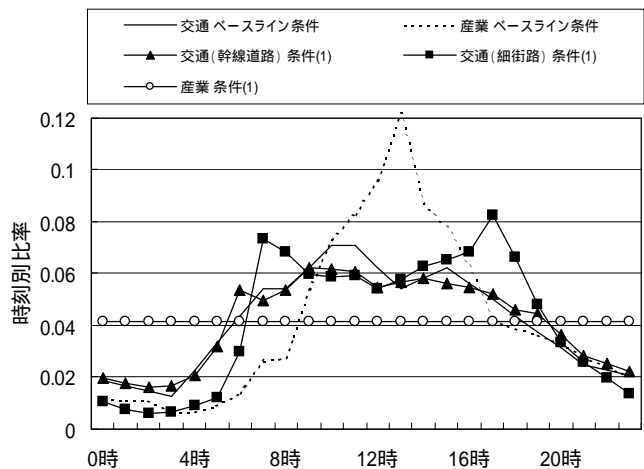


図 1 8 交通部門・産業部門排出時間パターン

阪神地域の都市熱環境を再現するとともに、人工排熱(全量および部門別)が都市熱環境に及ぼす影響について検討を行った。本章では、都市熱環境に強い影響を及ぼすパラメータを事前に把握し、人工排熱データベースを構築していく上での注意事項を整理することを目的に、人工排熱の排出特性に関する感度分析を行った。具体的には、各部門において、表 4 に示すように排出総量・排出時間パターン・排出鉛直位置・冷房機器比率等について複数条件で計算し、4 章で求めたベースライン条件との計算結果の比較を行うことによって、各パラメータの有する影響を評価した。

5.1 感度分析の設定条件

1) 民生・業務部門

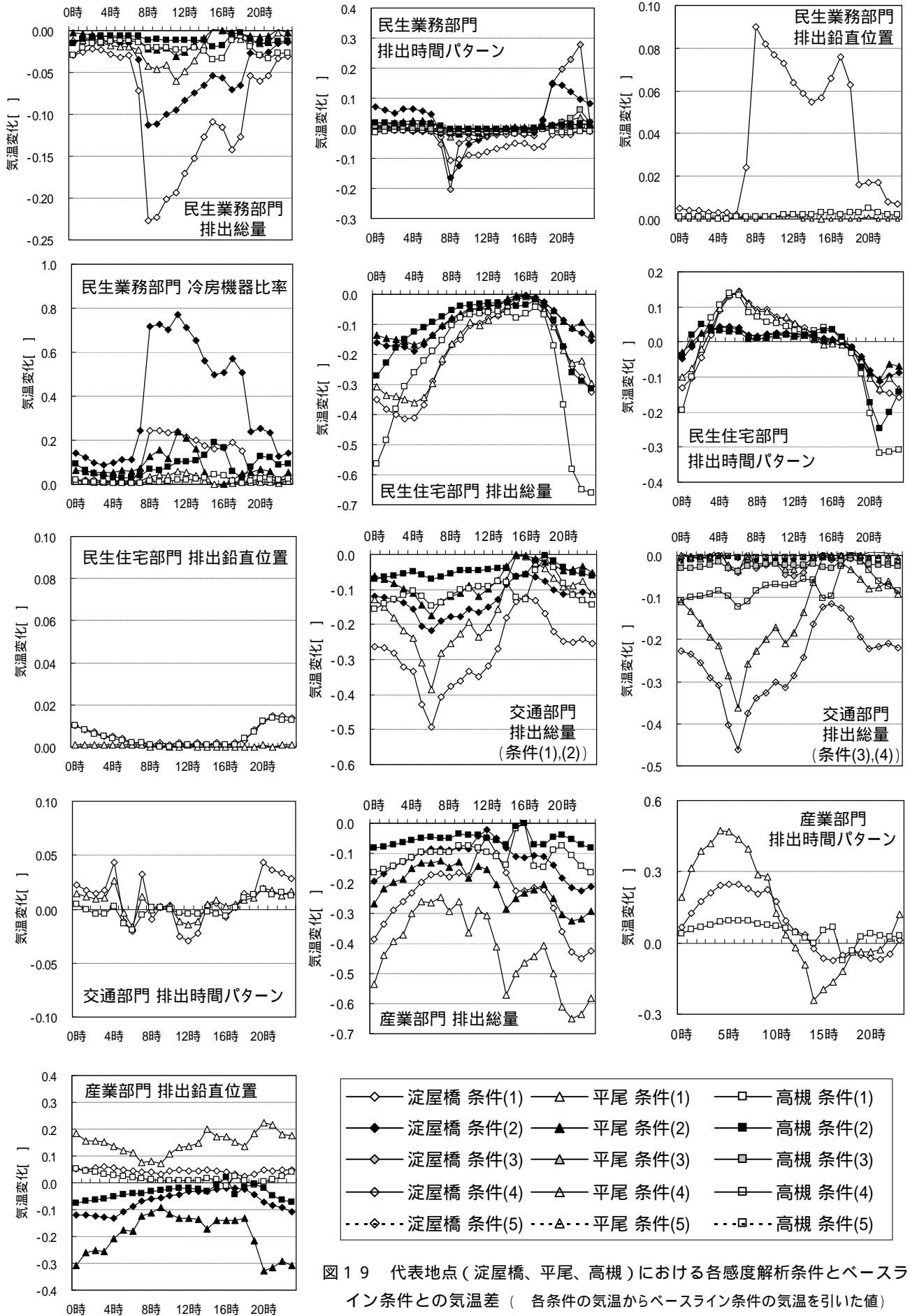


図 19 代表地点（淀屋橋、平尾、高槻）における各感度解析条件とベースライン条件との気温差（各条件の気温からベースライン条件の気温を引いた値）

民生業務部門に関しては、「排出総量」、「排出時間パターン」、「排出鉛直位置」、「冷房機器比率」の4項目について感度分析を行った。排出総量に関しては「条件(1):0%排出」、「条件(2):50%排出」の2条件、排出時間パターンに関しては「条件(1):8-18時に一定量を継続排出」、「条件(2):8-22時に一定量を継続排出」、「条件(3):業務地区における特別電力供給実績から作成した時間変化」の3条件、排出鉛直位置に関しては「条件(1):地上第1層(0-8m)において排出」の1条件、冷房機器比率に関しては「条件(1):空冷ヒートポンプの比率を倍増 増加分は電動ターボ冷凍機および吸収式冷凍機を各比率に応じて削減」、「条件(2):空冷ヒートポンプの比率を100%」の2条件をそれぞれ設定した。排出時間パターンの条件(3)は、業務建物が集積する大阪市中央区備後町付近の電力供給区における特別電力供給量実績データ⁽²⁰⁾から、夏期と中間期の差を冷房用電力消費量とし、この日変化を排出時間パターンと設定した。排出時間パターンについて、ベースライン条件とここで設定した3条件を図17に示す。

2) 民生・住宅部門

民生住宅部門に関しては、「排出総量」、「排出時間パターン」、「排出鉛直位置」の3項目について感度分析を行った。排出総量に関しては「条件(1):0%排出」、「条件(2):50%排出」の2条件、排出時間パターンに関しては「条件(1):0-24時に一定量を継続排出」、「条件(2):住宅地区における特別電力供給実績から作成した時間変化」の2条件、排出鉛直位置は「条件(1):地上第1層(0-8m)において排出」の1条件である。排出時間パターンの条件(3)は、住宅が集積する豊中市上新田地区付近の電力供給区における特別電力供給量実績データ⁽²⁰⁾から、業務部門と同様の方法で作成した。排出時間パターンについて、ベースライン条件とここで設定した2条件を図17に示す。

3) 交通部門

交通部門に関しては、「排出総量」、「排出時間パターン」の2項目について感度分析を行った。排出総量に関しては「条件(1):全0%排出」、「条件(2):全50%排出」、「条件(3):細街路のみ0%排出」、「条件(4):幹線道路のみ0%排出」、「条件(5):鉄道のみ0%排出」の5条件、排出時間パターンに関しては「条件(1):国土交通省・環境省による設定⁽²¹⁾」の1条件である。排出時間パターンについて、ベースライン条件とここで設定した条件を図18に示す。

4) 産業部門

産業部門に関しては、「排出総量」、「排出時間パターン」、「排出鉛直位置」の3項目について感度分析を行った。排出総量に関しては「条件(1):0%排出」、「条件(2):50%排出」の2条件、排出時間パターンに関しては「条件(1):0-24時に一定量を継続排出」の1条件、排出鉛直位置は「条件(1):地上第1層(0-8m)において排出」、「条件(2):地上第6層(81-209m)において排出(大阪市の主要煙突のエネルギー消費による重み平均高さ:144.5m)」の2条件である。排出時間パターンについて、ベースライン条件とここで設定し

た条件を図18に示す。

5.2 感度解析の計算結果

ベースライン条件に対して5.1節で述べた条件にそれぞれ変更し、メソスケール数値解析モデルによって計算を行った。計算結果として、図19に各条件のベースライン条件との気温差(各条件の気温からベースライン条件の気温を引いた値)を、大阪府内の代表地点(図16)における日変化として示す。

(1) 民生・業務部門

業務部門においては、都心部でいずれの条件においても最も大きな影響が見受けられる。排出総量に関しては、4.1節でも述べたように、後述する民生住宅部門と比較するとその影響は非常に小さく、特に臨海部や郊外部では一日を通して0.05に満たないものであった。排出量に応じた気温変化については、概ね線形的な変化を示した。時間パターンに関しては、大気が比較的安定な状況下にある7~8時や19~23時に影響が強く現れており、業務部門の排熱影響を評価する上では業務開始時刻や終業時刻の設定が非常に重要になると言える。排出鉛直位置の影響は最大でも0.1未満であり、その影響は非常に小さいことがわかる。以上のパラメータによる影響は最大で0.3の変化と、あまり大きな影響を与えていないが、これは4.1節でも述べた通り、業務部門排熱が主として大気不安定な昼間に多く排出されることによるものである。冷房機器比率に関しては、空冷式(空冷ヒートポンプ)が倍増することにより都心部で0.2、全空冷化することにより0.8近くの気温上昇が見られる。空調機の空冷化は排出顕熱総量の変化に大きな影響を与えるため、排熱による気温感度の小さい昼間にも関わらず大きな影響が見られており、業務部門の冷房機器比率の設定が非常に重要になると言える。

(2) 民生・住宅部門

住宅部門においては、都心部のみならず郊外部においても大きな影響が見受けられる。排出総量に関しては、23時に郊外部で最も大きく、その幅に関しても0.7弱と民生業務部門と比較して最大値で3倍程度と非常に大きいものであった。都心部や臨海部では4時頃に最大で0.4程度の影響がみられており、その影響は郊外部の半分程度であった。最も影響の強くなる時間帯は、地域の大気安定性と排熱量のバランスで決まるものであり、安定化の遅い都心部や臨海部では影響が最大となる時刻が遅くなる特徴が見受けられる。排出量に応じた気温変化については、排出総量が減少するにつれてやや気温変化が大きくなる傾向が見られた。これは排出量が減るにつれて大気が安定化に向かうため、気温感度が徐々に高まることによるものである。時間パターンに関しては、ベースライン条件のパターンがやや夜間割合の高い変化を示しており(図17)夜間割合の小さい感度解析条件では特に20時以降に大きな差異を生じている。排出鉛直位置に関しては、住宅部門は元々建物高さが低く、かつ各階排熱の設定であったため、鉛直位置の変化が小さいことから、影響はほとんど認められない。以

表5 感度解析結果から考察される各排熱特性項目の影響程度

部門	項目	影響程度			備考
		都心部	臨海部	郊外部	
民生業務部門	排出総量			×	始業終業時刻設定が重要
	排出時間パターン			×	
	排出鉛直位置		×	×	
	冷房機器比率				
民生住宅部門	排出総量				夜間に大きく影響
	排出時間パターン				夜間の設定が重要
	排出鉛直位置	×	×	×	
交通部門	排出総量(幹線)				昼夜を通して比較的大きな影響
	排出総量(細街路)	×	×	×	
	排出総量(鉄道)	×	×	×	
	排出時間パターン	×	×	×	
産業部門	排出総量				昼夜を通して比較的大きな影響
	排出時間パターン				夜間に大きく影響
	排出鉛直位置				

上の結果から、住宅部門の排熱影響は主として大気が安定することによって気温感度の高くなる夜間に排出されることから、総量や時間パターンの設定が非常に重要になると言える。

(3) 交通部門

交通部門においては、都心部に次いで臨海部でも大きな影響が見受けられる。郊外部は夜間の気温感度が高いにもかかわらず、その影響は小さいものであった。また、民生部門の業務建物や住宅の結果と比較して、交通部門は昼夜を通して影響が比較的大きいことがわかる。排出総量に関しては、明け方から7時にかけて影響が強く、都心部で最大0.5 の変化がみられた。この影響はほとんどが幹線道路からの自動車排熱の影響であり、細街路からの自動車排熱や鉄道排熱による気温影響は小さい。排出量に応じた気温変化については、民生住宅部門と同様に、排出総量が減少するにつれてやや気温変化が大きくなる傾向が見られた。時間パターンに関しては設定条件間に大きな違いがないことも影響して、その影響は小さいものであった。以上の結果から、交通部門の排熱影響は昼夜を通して比較的大きく、また幹線道路の自動車排熱の影響が大きいことから、幹線道路における日積算総量が重要になると言える。

(4) 産業部門

産業部門においては、臨海部に次いで都心部でも比較的大きな影響が見受けられる。また、交通部門と同様に、産業部門は昼夜を通して影響が比較的大きいことがわかる。排出総量に関しては、その影響が臨海部で大きく現れており、22時に最大で0.6 程度変化しているが、郊外部では0.2 程度の变化で地域間の差が大きいことがわかる。排出量に応じた気温変化については、概ね線形的な変化を示した。排出時間パターンに関しては、簡略化を意図して24時間一律で設定した場合、夜間には0.5 程度、昼間には0.2 程度の違いを生じており、昼夜ともに比較的大きな差異が認められる。排出鉛直位置に関しては、地上第1層ならびに地上第6層のいずれの条件に関しても、比較的大きな変化が認められる。以上の結果から、産業部門の排熱影響は昼夜を通して比較的大きく、排出総量はもちろんのこと、時間パターンや排出鉛直位置についてもその設定の影響は

大きいと言える。

6 . 結論

本研究では、大阪府を中心とした京阪神地域を対象に、メソスケール数値解析モデル⁽¹¹⁾の地表面境界条件となる人工排熱データベースの設定条件に関して感度解析を行うことによって、人工排熱の排出特性が都市熱環境の再現状況に及ぼす影響について基礎的な検討を試みた。以下に本論文で得られた知見を整理する。

1)最も気温上昇に影響を与えているのは民生住宅部門の人工排熱であり、次いで産業部門と交通部門が同程度、最も影響が弱いのは民生業務部門であった。産業部門は全部門中で最も排熱量が多いにも関わらず、影響が交通部門と同程度にとどまったのは、排出鉛直位置が高いことによる。

2)全部門排熱の有無による気温差は都心部および臨海部でほぼ同程度の値を示した。都心部では民生・交通・産業部門の影響がほぼ同程度であるのに対して、臨海部では産業部門の影響が支配的であった。

3)業務部門の排出時間パターンに関して、大気が比較的安定な状況下にある7～8時や19～23時に影響が強く現れており、業務部門の排熱影響を評価する上では業務開始時刻や終業時刻の設定が非常に重要になることが示された。

4)住宅部門の排熱影響は気温感度の高くなる夜間に排出されることから、排出総量や排出時間パターンの設定が非常に重要になることが示された。

5)交通部門の排熱影響はほとんどが幹線道路からの自動車排熱の影響であり、細街路からの自動車排熱や鉄道排熱による気温影響は小さいことが示された。

6)産業部門の排熱影響は昼夜を通して比較的大きく、排出総量はもちろんのこと、排出時間パターンや排出鉛直位置についてもその設定の影響は大きいことが示された。

以上の結果を総括すると、表5に示すように、部門ごと、排熱特性項目ごとに都市熱環境に及ぼす影響の程度を整理することが可能となる。人工排熱データベースの構築には多大な労を要するのが現状であることから、このような整理を行うことによって、将来的に様々な地区や年度を対象

として人工排熱データベースを整備し、都市熱環境を評価していくにあたり、研究者や行政などが優先的に整備すべきパラメータを選定することが可能になるとともに、ヒートアイランド対策を行うにあたり、最も気温度が高いパラメータに関連する事項について対応を検討するなど、効率的な対策シナリオを検討することが可能になると考えられる。

本研究では大阪府を中心とした京阪神地域を対象に評価を行ったが、人工排熱が都市熱環境に及ぼす影響には地域性が大きく影響することから、今後は床面積構成や産業構造、都市規模が異なる地域を対象に同様の検討を行うことによって、地域性の俯瞰を行うことが課題として挙げられる。

註記

(1)人工排熱データベースの作成方法に関する詳細は下田ら⁽¹⁰⁾、羽原ら⁽¹²⁾、鈴木ら⁽¹³⁾を参照されたい。

(2)本研究では民生部門の人工排熱として、空調起因ならびに給湯起因の放熱を考慮している。このうち空調起因の排熱については、冷却塔などの屋外放熱システムを通して放出される熱量から空調熱負荷のうち貫流および換気による取得熱量分を差し引いた値として定義している。すなわち、空調負荷のうち内部発熱や透過日射による取得熱量は人工排熱として定義される。なお、空調機の機器効率や顕熱排熱発生率は運転条件によって変化するが、本研究では表1に示すように固定値としている。

(3)顕熱(潜熱)排熱発生率は各空調システムを用いたときに大気に放熱される人工排熱のうち、顕熱と潜熱の配分を示している。

(4)産業部門の排熱量については、環境省の大気汚染物質排出量物質総合調査(平成11年度)を用い、高位発熱量に年間燃料使用量を乗じて算出したエネルギー消費量に顕熱・潜熱・水系排熱発生率をかけることで各経路別排熱量を算出している。

(5)大阪府域における建物延床面積は、住宅系の280km²に対して非住宅系は101km²であり、前者が74%を占めている。

(6)本研究の都市キャンピーモデルでは建物内部への日射透過を考慮しない一方で、人工排熱には透過日射による影響を含んでいる。また、都市キャンピーモデルの壁体に流入する熱量と、註記7で述べる建物の熱取得量についても、それぞれ計算方法が異なることから両者の値は一致しない。従って、本モデルでは大気と建物間の熱収支が一致していないが、この点については今後の課題と位置付けている。

(7)本研究では建物を住宅と非住宅に区分し、それぞれ代表的な建物モデルに対して空調熱負荷計算を行い、貫流負荷および換気負荷を求め、床面積あたりで原単位化した値を熱取得データ(顕熱潜熱別)として使用している。なお、住宅は筆者らが開発したScience-Macroモデル⁽²²⁾を、非住宅はHASP⁽²³⁾を用いて計算を行っている。取得熱量については、建物用途や建物構造、断熱性などを考慮した都市内

に存在するストック平均としての値を設定することが今後の課題として挙げられる。

(8)観測値には大阪府環境情報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2000年から2003年の8月を対象に海陸風が卓越している日のみを抽出した平均値を用いた。なお、海陸風日の判定には吉門⁽²⁴⁾と同様の方法を用いた。対象期間中のデータでは、雨天日が全体の21%、海陸風日が全体の26%、その他の非海陸風日が全体の53%を占めていた。

参考文献

- (1)尾島俊雄, 熱くなる大都市(1975), NHKブックス.
- (2)持田灯, 重要論文のレビューとリスト 都市気候変動, 日本建築学会総合論文誌, 1(2003), pp.128-133.
- (3)大岡龍三, ヒートアイランド研究の状況, 空気調和・衛生工学, 79-5(2005), pp.369-376, 2005年.
- (4)一ノ瀬俊明, 環境システムとしての大気・熱環境研究の来し方行く末, 第28回環境システム研究論文発表会講演集(2000), pp.3-10.
- (5)村上周三・持田灯・Sangjin KIM・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, 491(1997), pp.31-40.
- (6)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, 577(2004), pp.55-62.
- (7)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, 44(1997), pp.785-797.
- (8)足永靖信・李海峰・尹聖皖, 顕熱潜熱の違いを考慮した東京23区における人工排熱の排出特性に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 92(2004), pp.121-130.
- (9)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, 562(2002), pp.97-104.
- (10)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づけ その2 -, 日本建築学会計画系論文集, 555(2002), pp.99-106.
- (11)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, 83(2001), pp.1-9.
- (12)羽原勝也・岸本卓也・鳴海大典・近藤明・下田吉之・水野稔, 都市域における人工排熱が近畿圏のヒートアイランド現象に及ぼす影響, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(2005), pp.2173-2176.

- (13) 鈴木晶・羽原勝也・鳴海大典・近藤明・下田吉之・水野稔, 関西圏から排出される大気熱負荷の地域特性評価, 空気調和・衛生工学会近畿支部研究発表会論文集(2006), pp.215-218.
- (14) 空気調和・衛生工学会近畿支部, 関西地区建物エネルギー消費実態調査報告書(1997), 空気調和・衛生工学会近畿支部.
- (15) 環境省, 平成11年度大気汚染物質排出量総合調査(1999).
- (16) 国土交通省, 平成15年度鉄道統計年報(2003).
- (17) 石油連盟, 石油資料月報(2004年), 石油連盟ホームページ.
- (18) 全国デジタル道路地図協会, 全国デジタル道路地図データ.
- (19) 国土交通省, 平成11年度自動車輸送統計(1999).
- (20) 鳴海大典・二浦尾友佳子・下田吉之・水野稔, 気温変化が地域の電力消費に及ぼす影響, エネルギー資源, 163(2007), pp.13-19.
- (21) 国土交通省・環境省, 平成15年度都市における人工排熱抑制によるヒートアイランド対策調査報告書(2004).
- (22) 羽原宏美・鳴海大典・小林誠治・下田吉之・水野稔, 自然通風を行う住宅の室内温熱環境および空調エネルギー消費予測手法の開発, 日本建築学会環境系論文集, 582(2004), pp.107-114.
- (23) 松尾陽, HASP/ACLD/8501解説, 社団法人建築設備技術者協会,(1985).
- (24) 吉門洋, 近年の光化学オキシダント濃度変化の一要因, 大気環境学会誌, 39(2004), pp.188-199.

(Received November 16, 2008, Accepted March 6, 2009)