

# 都市の気候と空調エネルギー需要に対する 排熱フィードバック効果の定量化

## A Quantification of Feedback Impacts of Anthropogenic Heat on Urban Climate and Building Energy Demand for Air Conditioning

亀卦川 幸浩\*

### 1. はじめに

猛暑による熱中症や豪雨水害等、全球の気候変動とそれに関連し頻発化しつつある極端気象のリスクは、ヒートアイランド効果も相乗し、人類の過半が居住する都市への集中を呈しつつある（IPCC 第5次評価報告書）。加えて、都市域には気候変動に伴う空調エネルギー需要の増減が、気候変動要因としてのCO<sub>2</sub>排出量や人工排熱量を変化させるフィードバックも存在する。これは夏季に positive feedback（以降 PFB）を生じさせ得る。しかし、その効果はこれまでの将来気候予測で考慮されていない。アジアでは今世紀中葉までに10億人超の都市人口の増加が予測されているが、それに伴う冷房需要増加はPFBの悪影響を増長させる危険性がある。以上の観点からPFBの研究は重要であるが、PFBの都市気温や空調エネルギー需要への影響を定量化した研究は殆ど存在しない。

そこで本研究では、都市における夏季の冷房エネルギー消費の増加を原因とした排熱増加に伴って都市域の気温上昇が発生し、その昇温により冷房需要が更に増大するという、冷房エネルギー消費に対するPFB効果に着目した。著者らは2013年度に大阪市域で気象と電力需要を通年観測し、その観測結果からエネルギー消費と人工排熱に起因する大阪の気温上昇量を推計した<sup>1)</sup>。加えて、単位気温上昇に伴う夏季の電力需要増分を表す電力需要気温感応度を定量化した<sup>2)</sup>。本研究では、以上の手法を踏襲し、大阪市域での休日に対する平日のエネルギー消費と排熱の増加による気温上昇量を推計し、その昇温が追加的に何%の電力消費増を夏季の電力需要にもたらすかを意味するPFB感度（以降、電力PFB感度）について実測ベースでの推計を行った。更にPFB

効果を考慮した世界初の独自開発の数値モデルであるWRF-CM-BEM<sup>3)</sup>を大阪に適用し、同モデルが実測ベースの電力PFB感度を再現できるかの検証を試みた。

加えて、以上の検証を経たWRF-CM-BEMを用い、夏季大阪を対象に都市の地上気温に対して人工排熱がもたらすPFB効果の強度を表す“気温PFB感度”についても定量化を試行した。即ち、PFBのせいで都市の地上気温は何%押し上げられているかの推計も試みた。

### 2. 研究手法

#### 2.1 実測資料にもとづく電力PFB感度の推計

著者らは、大阪の15街区で気象観測を行った<sup>1)</sup>。期間は2013年3月14日から2014年3月17日までの369日間であり、気象観測地点を含む街区（配電用変電所の各電力供給エリア）での電力需要量データも収集した。観測はFig. 1に示した15街区

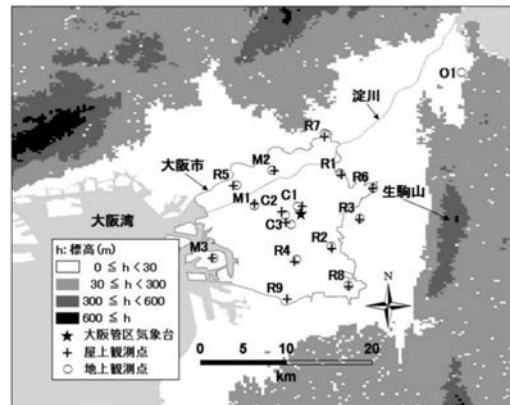


Fig. 1 Geographical locations of observation sites in the urban region in Osaka, Japan

\* 明星大学理工学部 教授

で実施し、屋上・地上の気温・湿度や日射量等を計測した。

上記の通年計測された毎時の地上レベルの測定気温を対象に、まず、街区ごとに平日と休日の気温差を解析した。これは平日と休日で街区気温に統計的差異が見られた場合、その気温差はエネルギー消費とその結果生じた人工排熱の増減に依ると考えられるためである。しかし実際には、気圧配置等による広域の気象変動も都市域の気温に平日・休日間の差異をもたらし得る。この事も考慮し、上述の街区毎の平日・休日の気温差から都市効果を受けない大阪市近郊の生駒山 AMeDAS 局での平日・休日の気温差を差し引く方法で、エネルギー消費と排熱の増減のみによる気温差（以降、 $\Delta T_{AH}$ ）を推計した。この $\Delta T_{AH}$ は、休日に対する平日のエネルギー消費と人工排熱の増加による正味の街区毎の気温上昇量を意味する。

次に、15 街区域の毎時の電力需要量データと地上レベルの気温・比湿の観測データを使用し、文献<sup>2)</sup>と同様の重回帰モデルを用い、夏季平日の単位気温上昇に伴う電力需要量 (E) の増分を意味する電力需要気温感応度（以降、 $(\Delta E/\Delta T)_s$  [W/floor-m<sup>2</sup>/°C]）を求めた。更にその $(\Delta E/\Delta T)_s$ を冷房期平日の E の平均値 ( $E_m$ ) で除することにより、夏季平日の単位気温上昇に伴う各街区の電力消費量の増加率を意味する $(\Delta E/\Delta T)_s/E_m$  [%/°C] を推計した。

以上の $\Delta T_{AH}$ と $(\Delta E/\Delta T)_s/E_m$ の街区毎の時別値の積を算出することで、休日から平日へのエネルギー消費と排熱の増加→気温上昇→更なる夏季電力消費増のパーセンテージを意味する電力 PFB 感度（= $\Delta T_{AH} \times (\Delta E/\Delta T)_s/E_m$ ）を 2013 年 7 月・8 月の夏季二ヵ月を対象に推計した。

2.2 シミュレーションによる電力 PFB 感度の推計

著者らは、米国の次世代領域気象予測モデル WRF に独自の多層都市キャノピーモデル (CM) とビルエネルギーモデル (BEM) を結合させる事で、PFB 効果を表現できる数値モデル (WRF-CM-BEM) を開発している<sup>3)</sup>。本研究では、同モデルを用い、実測データと同様の期間の数値実験を行った。その計算値を用い、実測値と同様の解析方法で電力 PFB 感度を推計した。但し、WRF-CM-BEM 内では各計算グリッドが 1 種類の建物で構成されているとの仮定のもと計算がなされる。そのため、実測の PFB 感度との比較に際しては、モデルの仮定と整合し、概ね単一用途の建物から構成される事務所街

Table 1 Reproducibility of meteorological elements and electricity demands in C2, R4, and R7 by WRF-CM-BEM

Items	Error indices	Clear-sky	Cloudy	Overcast	Total
insolation	MAPE (%)	7.94	52.66	304.80	76.22
surface air temp.	RMSE (°C)	1.43	1.53	2.47	1.65
electricity demand	MAPE (%)	11.02	11.94	22.20	12.95

の C2, 戸建住宅街の R4, 集合住宅街の R7 を解析対象とした (Fig. 1)。また、WRF-CM-BEM の基本性能を確認した結果、上述の 3 街区における気温と電力需要の再現性は、天空状態に依存する日射量の再現精度により左右される事が判明した (Table 1)。即ち、日射量の再現性が良好な Clear-sky 時には気温・電力需要の再現精度も高い一方、Overcast 時には日射量の計算値が実測値に対し著しく過大評価となり、気温・電力需要の再現精度も低下する事が分かった。これは、WRF を用いた多くの先行研究で指摘されている曇天時の日射過大評価の問題に起因した。この為、PFB 感度の算出に際しては、Overcast の日 (6 日間) のデータを実測値と計算値から除外する事とした。加えて、電力需要の特異日である盆の平日 (2013 年 8 月 13 ~ 16 日) も除外し解析を行った。

2.3 シミュレーションによる気温 PFB 感度の推計

WRF-CM-BEM 内では建物とその周辺大気のを対象に Fig. 2 に示す熱収支が模擬される。一方、気温 PFB 感度は、気象モデル内の都市気温に上昇方向の擾乱を与え、それによる排熱増の帰結としての気温と排熱増が無かった場合の気温を比較する事で原理的に算出可能である。しかし、その方法では、後者の気温上昇時の排熱増を無視する数値実験にて Fig. 2 のエネルギー保存を満たさない実験を行う事

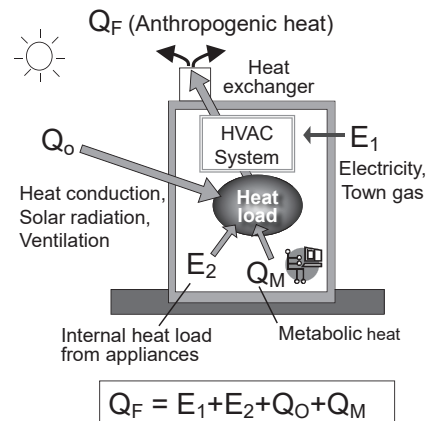


Fig. 2 Building & surrounding atmosphere heat balance

になり、物理的な合理性に問題が生じる。

以上の問題を加味し、本研究では都市大気と建物の系のエネルギー保存を満たす数値実験を通じ気温PFB感度を定量化する方法を考案した (Fig. 3)。本手法では、2.1と同様、都市域での平日・休日間の系統的なエネルギー需要差異に着目し、その差異によって生じる排熱擾乱に対する都市気温の応答感度を定量化する方法を採用した。対象都市域について平日想定と休日想定と共にエネルギー保存を満たした2ケースの数値実験を行い、その結果から気温PFB感度を算出した。具体的手順は次の通りである。

- ・大阪を含む関西圏に WRF-CM-BEM を適用し、2006 年から 2015 年の 10 年間の 8 月を対象に、電力実需要等にもとづくエネルギー需要の平日・休日コントラストを考慮した数値実験を行った。実験は全日を平日または休日とみなす 2 ケースで実施した。計算領域や WRF-CM-BEM の他の計算条件は著者らの既往研究<sup>4)</sup>と同じ設定とした。
- ・平日ケースの計算結果 (地上気温と人工排熱熱量) から  $S_{AT}$  感度 (1°C の昇温につき排熱熱量が何  $W/m^2$  増えるかを表す感度) を格子別・時別に算出した。
- ・平日ケースと休日ケースの間での地上気温と人工排熱熱量の差分量を求め、後者の排熱擾乱に対する前者の地上気温応答の感度 ( $S_{TA}$  感度;  $1W/m^2$  の単位排熱増による昇温量) を格子別・時別に算出した。
- ・ $S_{AT}$  感度と  $S_{TA}$  感度が有意水準 5% の t 検定にて共に有意である場合に、両感度の積を気温 PFB 感度として格子別・時別に算出した。

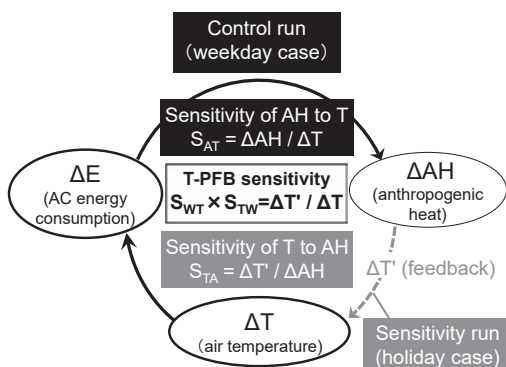


Fig. 3 Methodology for estimation of T-PFB sensitivity

### 3. 結果

#### 3.1 電力 PFB 感度

2.1 と 2.2 の方法で推計された  $\Delta T_{AH}$  と  $(\Delta E/\Delta T)_s / E_m$  および両者の積である電力 PFB 感度について、各街区での実測ベースの推計値とシミュレーションに基づく推計値を比較した結果を Fig. 4 に示す。図中、実線は  $\Delta T_{AH}$  と電力 PFB 感度 (図中の PFB [%])、点線は  $(\Delta E/\Delta T)_s / E_m$  を指し、太線が実測値、細線がシミュレーション値を表す。解析の結果、WRF-CM-BEM は  $\Delta T_{AH}$  と  $(\Delta E/\Delta T)_s / E_m$  および電力 PFB 感度の各街区における水準を、ピーク値の出現時刻等の時間変化の一部誤差を除き、概ね再現可能である事が判明した。また、各街区での休日から平日へのエネルギー消費増に起因す電力 PFB 感度は事務所街 C2 のピーク値 2% に対し、住宅街の R4 と R7 で日最大値が共に 3% 程度であり、住宅街区での電力 PFB 感度の増加が認められた。以上の総電力需要ベースの感度を冷房電力需要に対する感度に換算した場合、電力 PFB 感度は 10% 前後の感度となり、PFB による冷房電力消費の押し上げ効果は 1 割程度と見積もられた。

本研究では更に計算領域内の全てのエネルギー消費を無しとする仮想的な数値実験を行い、休日では

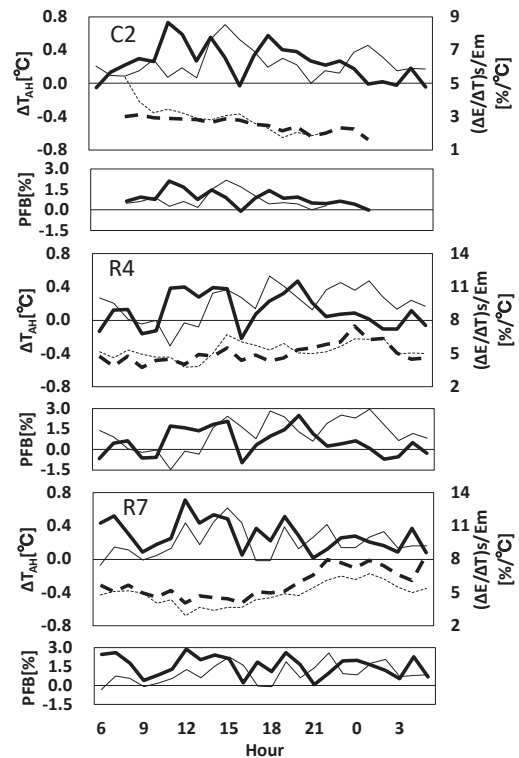


Fig. 4 Daily courses of observed and simulated  $\Delta T_{AH}$ ,  $(\Delta E/\Delta T)_s / E_m$ , and PFB sensitivities in C2, R4, and R7 areas

なく無排熱状態を基準とする電力 PFB 感度も推計した。その結果、住宅街区に比し排熱量が大きい C2 街区では無排熱とのコントラストにより電力 PFB 感度が 1.5 倍程度に増加する結果が得られた。

以上の結果より WRF-CM-BEM は電力 PRB 感度の実態を再現可能であり、PFB を考慮した都市気候予測に適用可能なモデルである事が示唆された。

### 3.2 気温 PFB 感度

大阪市域の計算格子（水平解像度 1km）を延床面積ベースの支配的建物用途に照らし、木造戸建住宅街（126 格子）、耐火造集合住宅街（71 格子）、商業・事務所街（75 格子）の 3 カテゴリに分類し、上述の方法で格子別・時別の気温 PFB 感度を算出した。その内、商業・事務所街と戸建住宅街についてカテゴリ平均の気温 PFB 感度の算出結果を Fig.

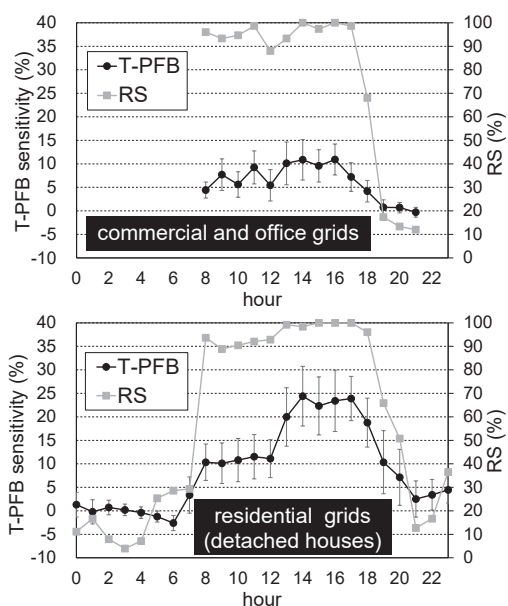


Fig. 5 Urban category wise averaged hourly T-PFB sensitivity with standard deviation (vertical bar) and RS (ratio of grid with significant T-PFB sensitivity in t test when  $\alpha = 0.05$ )

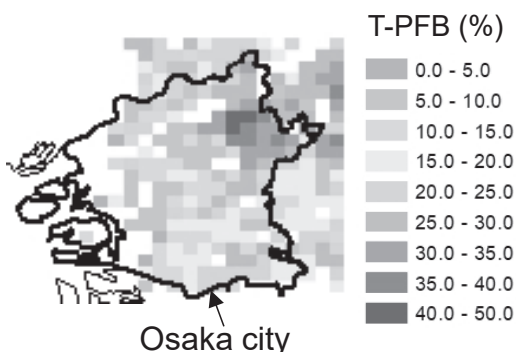


Fig. 6 Distribution of climatological T-PFB sensitivity in summer Osaka at 3 p.m.

5 に示す。また、気温 PFB 感度の空間分布の解析例として、各カテゴリの感度が日最大値を示した 14 時～17 時の時間帯より 15 時における気温 PFB 感度の分布を Fig. 6 に示す。なお、両図中、T-PFB が気温 PFB 感度を指す。

以上の解析の結果、全カテゴリの概ね 90% 以上の都市格子で 8 時～17 時の時間帯に気温 PFB 感度が有意となった。同時時間帯における PFB 感度のカテゴリ別の平均値は、商業・事務所街で 8%、木造住宅街で 17%、集合住宅街で 18% であった。また時刻別に見た最大値は、商業・事務所街で 11% (16 時)、木造住宅街で 24% (14 時)、集合住宅街で 28% (17 時) となった。一方、気温 PFB 感度の空間分布についてみると、都心の商業・事務所街より内陸側の住宅街の格子にて感度の増加が認められた (Fig. 6)。これは、都心街区の排熱が海風等の西寄りの風で内陸側の住宅街に移流され、当該住宅域での  $S_{TA}$  感度が増加するメカニズムにより生じているものと推察された。

### 4. まとめ

夏季大阪を対象に排熱ポジティブフィードバックが冷房電力需要にもたらすインパクト（電力 PFB 感度）の定量化を試みた。結果、大阪市域の電力 PFB 感度の各種実測資料にもとづく推計値は 10% 前後の値となり、排熱ポジティブフィードバックによる冷房電力消費の押し上げ効果は 1 割程度と見積もられた。以上の実測ベースの電力 PFB 感度は、独自開発の都市気象数値モデル WRF-CM-BEM により概ね再現可能であることも確認された。更に、平日・休日間のエネルギー需要差異による排熱変動に着目し、都市大気と建物の系のエネルギー保存を満たす気象数値実験にもとづき、都市気温に対する排熱ポジティブフィードバック効果の強度を表す気温 PFB 感度も解析した。WRF-CM-BEM を用いた解析の結果、夏季大阪市域での気温 PFB 感度は日平均で 10～20% のレンジにあり、排熱ポジティブフィードバックは夏季大阪の地上気温の昇温を 1 割～2 割程度自己強化する方向に作用しているものと推察された。

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 基盤研究 (B) 16H04441 と環境研究総合推進費 (JPMEERF20191009) の助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) Ohashi, Y., M. Suido, Y. Kikegawa, T. Ihara, Y. Shigeta, M. Nabeshima, Impact of seasonal variations in weekday electricity use on urban air temperature observed in Osaka, Japan, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, Vol.142 (2016), pp.971-982.
- 2) 橋本侑樹・鍋島美奈子・重田祥範・亀卦川幸浩・井原智彦, 業務および住宅街区の気温・湿度に対する電力感応度の解析と考察 —2013年・大阪市内の観測を通して—, 日本建築学会環境系論文集, Vol.81 (2016), pp.827-834.
- 3) Kikegawa, Y., A. Tanaka, Y. Ohashi, T. Ihara, Y. Shigeta: Observed and simulated sensitivities of summertime urban sur-face air temperatures to anthropogenic heat in downtown areas of two Japanese major cities Tokyo and Osaka, *Theoretical and Applied Climatology*, Vol.117 (2014), pp.175-193.
- 4) 亀卦川幸浩・山川洋平・徳竹衿也・大橋唯太・高根雄也・井原智彦・鍋島美奈子, 日射と電力需要の再現性に着目した都市気象・建物エネルギー連成数値モデルの検証, 土木学会論文集 G (環境), Vol.73, No.2, pp.57-69, 2017.

## 著者略歴

亀卦川幸浩 (キケガワ ユキヒロ)



1992年3月 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻修士課程修了。同年4月 株式会社富士総合研究所(現 みずほ情報総研)入社。1998年9月 新エネルギー・産業技術総合開発機構出向(通産省工業技術院資源環境技術総合研究所勤務)。2001年 学位取得(博士(工学), 東京大学)。2005年1月 独立行政法人産業技術総合研究所特別研究員。2005年4月 明星大学理工学部助教授。2007年4月 同准教授。2012年4月 同教授(気象・熱環境研究室を主宰, 現在に至る)。