

(40) 東京の人工熱排出構造とその時間変動について

CHARACTERISTICS OF HEAT EXHAUST IN TOKYO METROPOLIS

守田 優*, 竹内友昭**

by Masaru Morita and Tomoaki Takeuchi

ABSTRACT; This paper studied the characteristics of heat exhaust of Tokyo Metropolis. Heat exhaust recently caused heat island phenomena, one of the urban environmental problems. First we investigated the heat exhaust structure from the viewpoint of heat exhaust load per unit energy consumption through analysing the statistics regarding energy use in the metropolis and clarified the relation between the energy use and the heat exhaust. Second we calculated the hourly fluctuation of heat exhaust on a summer day by assuming 24 hour consumption fluctuation curves of electric power, city gas and petroleum products. The study indicated the total heat exhaust of Tokyo Metropolis, 2.1×10^8 Gcal/year, and the distribution of the exhaust which strongly concentrate in the center of the metropolis. Furthermore the heat exhaust of the four central wards exceeds 100 W/m^2 on time average and hourly fluctuates between 30 W/m^2 and 130 W/m^2 .

Key words; heat exhaust, waste heat, heat island, urban environment

1. はじめに

東京をはじめとする大都市では、産業、交通や様々な業務活動にともない大量のエネルギーが消費され、そのエネルギーが最終形態である熱となり、アスファルトやコンクリートなどの地表面被覆の変化と相まって都市の気温を上昇させている。著者らは、東京を対象に、これらの要因についてすでにマクロ的な検討を行い、都市域の地表面被覆状態の変化が熱収支特性を大きく変えること、そして人工熱の排出量が熱環境的に無視できない大きさであることを明らかにした^{1) 2)}。しかし、人工熱排出量についての第1報²⁾では原単位の設定に若干の問題を残しており、合理的で正確な推算が望まれるとともに、人工熱の影響についても夜間と日射のある昼間とはその現れ方に違いがあり、熱環境への影響を評価するためには人工熱排出量の24時間の時間変動を明らかにする必要がある。

本研究では、東京都を対象として人工熱の排出構造とその時間変動について調査解析した。まず、東京の人工熱排出構造、すなわちエネルギー種別、用途別の発生量の地域分布について調査し、熱排出原単位についても再検討を行った。さらに、人工熱発生量の時間変動、特に熱帯夜で問題になる夏期8月の人工熱排出量の昼間・夜間の時間変動を明らかにした。

* 芝浦工業大学土木工学科 正員 港区芝浦3-9-14

** 芝浦工業大学大学院 学生員 同上

2. 東京都の熱排出量の調査解析（その1）

人工熱排出量の解析には、従来、消費エネルギー用途別原単位に数量である基礎指標を乗じて計算する方法（以下、原単位法という）がとられ、それによって人工熱排出量の地域分布等が調査されてきた。著者らも、この方法により東京都の人工熱排出量を調査し、その結果を第1報として報告した²⁾。しかし、この原単位法では、原単位の評価によって結果が大きく左右され、また原単位に乘じる基礎指標についても統計資料が整っていることが必要である。その意味で、原単位法ではいちおう人工熱排出量は算定できるが、従来、それが正しいかどうか検証する手段がなかったと言える。本研究では、原単位法とともに、エネルギーの実績供給量や販売量から人工熱排出量の総量を算定し、これによって原単位法による計算結果を検討し、より信頼性のある人工熱排出量を算定する。以下において、まず原単位法によって人工熱排出量を計算し、次にエネルギー種別供給量からそれを検証する。

2. 1 原単位法による解析

人工熱排出量の解析においては、エネルギー用途別に熱排出原単位を調査し、それに基礎指標を乗じて熱排出量を求める。東京都を対象とした人工熱の排出量については、すでに尾島³⁾らによる算定があるが、調査時点がオイルショック時の1975年前後であり、現在の東京都の一極集中と産業構造の変化により、基礎指標の伸びとともにクーラーの普及などエネルギー消費構造も変化している。本研究では、基礎指標を1987年に設定するとともに、原単位については、政府機関や電力会社等の既存の統計資料を調査し、妥当な値となるよう努めた。第1報²⁾では、原単位の一部について1975年当時の調査資料を用いざるを得なかったが、本研究では再検討を行った。都市における人工熱の排出源を消費エネルギーの用途から以下のようにA)～E)に分類し、さらに細分類を行い、用途別原単位と区や市など行政区ごとに基礎指標を求めた。

A) 工場に代表される生産施設

生産施設については日本標準産業分類F製造業の産業中分類を用いて23業種に分類した。ここで対象とする工場は従業者数4人以上のものとし、それ以下のものは住宅として扱った。原単位は敷地面積単位と従業者数単位の二つが考えられるが、両者を検討し、最終的に後者を採用した。基礎指標は、「1987東京の工業（昭和62年工業統計調査報告）」（平成元年・東京都）で調べ、原単位は、「昭和62年石油等消費構造統計表（商鉱工業）」（平成元年・通商産業省）をもとに設定した。

B) 住宅、業務施設、商業施設などに代表される生活施設

この生活施設については、熱排出構造の面から、住宅と一般建物に区別して集計した。まず住宅の熱排出量の原単位は、延床面積単位、世帯数単位の二つを検討したが、東京都は世帯当たりの住居面積が小さいため、後者の原単位⁴⁾を採用し、9400kcal/世帯とした。

また、一般建物については、事務所、商業施設、ホテル、学校、病院など13の施設に細分類し、各々について東京電力の調査資料⁵⁾をもとに原単位を設定した。この調査は、一般建物の延床面積当たりの原単位を建物の種類別に明らかにし、さらに各々エネルギー種別内訳も調べているものであるが、電力の熱量への換算にインプットベースの換算値2450kcal/kWhを用いているため、アウトプットベース860kcal/kWhに変換した。また昭和50年と調査時点も古いため、原単位を修正した。すなわち、エネルギー消費原単位のうち電力分について、その後の業務用ビルの電力の消費原単位の伸びを調べ⁶⁾、昭和50年時の50%増しにして全体のエネルギー消費原単位を求めた。こうして設定した原単位を表-1に示した。

表-1 一般建物の用途別熱排出原単位 (Gcal/m²yr)

事務所	商業施設	ホテル	学校	病院	娯楽施設	その他
0.30	0.53	0.70	0.18	0.58	0.40	0.18

なお、原単位に乗じる基礎指標に関しては、世帯数¹²⁾をもとにする住宅以外、特に事業所、商業施設については都および市町村の固定資産課税台帳に登録されている建物の延床面積に用途別土地利用比率を乗じて計算し、他の建物については、既存の報告書や統計資料を参考に個別に算出した。

C) ゴミ焼却施設、発電所などに代表される供給処理施設

ゴミ焼却施設については、東京都のゴミ焼却にともなう熱排出量の原単位(単位処理量当たり)にゴミ焼却量¹²⁾を乗じて求めた。熱排出原単位は、焼却炉の性能によって異なり、新しいもののほど設計最高発熱量は大きい。ここでは、都内13の清掃工場の平均的な発熱量として、1580kcal/kgを設定した。また、上下水道については、浄水場と給水所及び下水処理場とも、受電量^{7) 8)}に熱量換算値860kcal/kWhを乗じた。

D) 自動車、軌道車等に代表される交通運輸施設

交通運輸施設は自動車類と鉄道類に分け、自動車類については原単位に走行距離を乗じて求める方法を取り、鉄道類については、東京都全体の鉄道の電力消費量をもとに計算した。

まず、自動車類については、自動車走行の分布にもとづく計算が現実には不可能なので、ここでは乗用車類、貨物車類の登録地別の走行距離データ⁹⁾から計算することにした。このため、各自動車類の熱排出量はその登録地(区や市)からの排出となる。熱排出原単位は、運輸関係の統計資料¹⁰⁾の乗用車と貨物トラックの値をもとに、自動車類930kcal/km、貨物車類2500kcal/kmとした。

また、鉄道類は東京都全体の使用電力量を調べ(1987年度実績で 1.79×10^8 kWh)、それから熱量換算した熱排出量を路線長によって比例配分し、東京都内の各区や市の排出量とした。ただし、これにはJR東日本の分が含まれていない。これに関しては、都内各線について東京都内の営業キロ数と列車回数から走行距離を求め、それに熱排出原単位の実績値¹¹⁾を乗じて、さらに路線長による比例配分で熱排出量を計算した。

E) 人の行動による人体からの発熱

人体からの発熱量は、人の移動を考慮し、各区や市の夜間人口と昼間人口をもとに計算した。人体からの発熱原単位は120kcal/hr人とし、両人口にそれぞれ12時間ずつ乗じて1日の発熱量を求めた。

2. 2 計算結果と考察

本研究の解析結果では、東京都全体の人工熱排出量は 2.08×10^8 Gcal/yrとなった。また、地区別に熱排出量を見ると、千代田区、中央区などの都心部が高い熱排出量を示し、特に都心4区では 3.54×10^7 Gcal/yrとなり、都全体の17%に相当する。23区では、 1.64×10^8 Gcal/yrとなり、これは都全体の79%に当たり、東京都のエネルギーの大半が23区で消費されていることになる。また、単位面積当たりの熱排出量(熱排出指標)では、都心4区で77.7W/m²、23区で35.9W/m²となり、人工熱排出量が都心4区に集中していることが明らかである。図-1は人工熱排出基礎指標の等値線図であるが、このことを鮮明に示している。

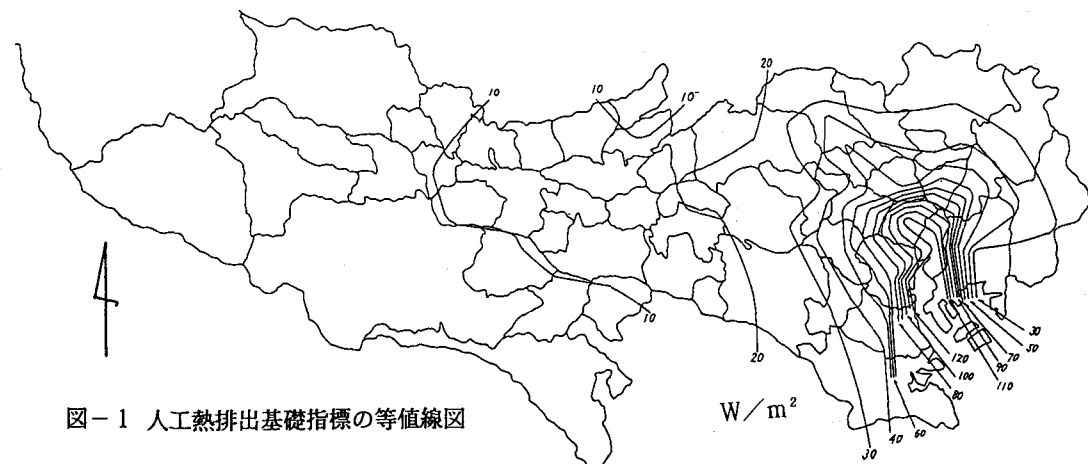
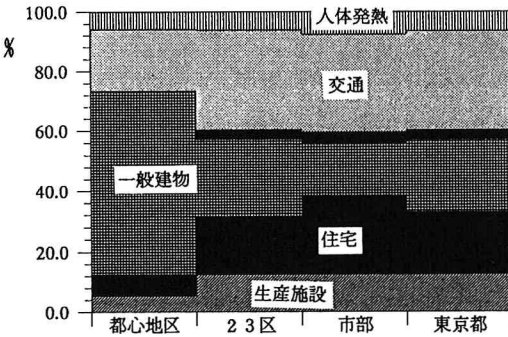


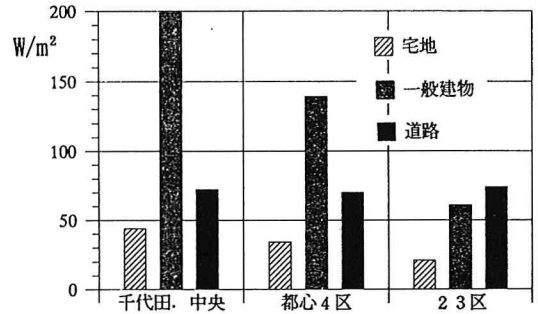
図-1 人工熱排出基礎指標の等値線図

図－2は地区別用途別の熱排出構造を示した算定結果の例であるが、都心部では一般建物（その60%がオフィスビル）からの熱排出が半分以上を占め、都心部から郊外へ住宅の熱排出の割合が増加する。

さて、以上は行政区域における熱排出量の議論であるが、宅地、道路など土地利用による熱排出量を考えてみる。例えば、都心4区の範囲で平均した住宅からの熱排出指標が分かっているならば、都心4区の宅地面積と全体の面積の比から、宅地から単位面積当たりに排出される人工熱量が計算できる。同様の計算が、一般建物についても、道路（自動車類の熱排出指標から）についても可能である。そこで、これらの面積を統計資料¹²⁾で調べ、熱排出指標の面積による換算を行った結果が図－3である。ここでは、千代田区・中央区、都心4区、23区の三つについて計算した。図からわかるように、一般建物では、千代田、中央で199W/m²、都心4区で139W/m²という値である。また、道路については、いずれも70W/m²前後の値が得られている。



図－2 地区別用途別の熱排出構造



図－3 土地利用別の熱排出指標

3. 東京都の熱排出量の調査解析（その2）

3. 1 人工熱排出総量の計算（エネルギー種別供給販売量による検討）

人工熱の発生源を、エネルギー種別から分類すると、電力、ガス、LPG、石油製品（ガソリン、灯油、軽油、重油）となる。もし、これらのエネルギー種別の年間供給量や販売量がわかれば、それが消費されたとして人工発熱量を計算することができる。東京都では、1950年代からこれらのエネルギー（LPGを除く）の供給量、販売量が統計として整理されており¹²⁾、その統計をもとに人工熱発生量を算定することが可能である。ただし、交通関係の消費、特に供給、販売と消費とで場所が異なる自動車類については、交通の実態に即した若干の修正が必要となる。こうして、このエネルギー消費量をもとに行った1987年を基準とした人工熱発生量の計算結果をエネルギー種別に示すと表－2のようになった。この計算による東京都全体の人工熱発生量は、 $1.94 \times 10^8 \text{ Gcal/yr}$ となった。

表－2 エネルギー種別供給販売量による人工熱発生量（下段 $\times 10^{13} \text{ kcal}$ ）

電力	都市ガス	ガソリン	灯油	軽油	重油	人体
860kcal/kwh	——	8400kcal/l	8900kcal/l	9200kcal/l	9600kcal/l	120kcal/h
4.55	2.87	2.61	1.82	2.00	4.22	1.35

上の計算では、自動車類の消費として、ガソリンを0.90、軽油を0.95で補正している。

3. 2 原単位法との比較

ここで3. の原単位法による計算結果と比較する。原単位法での年間の人工熱排出量は、 $2.08 \times 10^8 \text{ Gcal/yr}$ である。この値は、表-2のエネルギー消費総量による計算結果 $1.94 \times 10^8 \text{ Gcal/yr}$ より7%程度多い値となっている。しかし、1割弱という精度であり十分満足できる結果と言える。なお、表-2では、LPGの消費による熱排出量が計上されておらず、その分を加えればさらに精度が上がるのが予想される。

4. 人工熱排出量の時間変動

人工熱排出量の時間変動を算出するには、これまでの計算で用いた原単位や基礎指標、あるいは、エネルギー種別の消費量といった時間的に平均化されたデータのほかに、時間変動に関するデータが必要になる。

2. の原単位法によって人工熱排出の時間変動を求めるには、用途別にエネルギー使用量の時間変化を知らなければならないし、3. のエネルギー種別消費量による方法では、エネルギー種別ごとに消費量や供給量の時間変動が計算に必要なことになる。ここでは、データの得やすい後者の方法をとることにした。

4. 1 調査解析方法

本研究では基準を1985年8月に設定した。また、計算対象を東京都23区および都心4区（千代田、中央、港、新宿）とした。その計算方法として、3. の手順により東京都の資料¹²⁾ による電力、都市ガスの供給量および石油製品販売量の月別データをもとに、東京都の人工熱排出量の1985年8月の日熱排出量の平均値をエネルギー種別に求めた。さらに、この都全体の値からエネルギー種別の消費量の地区分布の推計値¹³⁾をもとに都23区および都心4区の値を算出した。これらの日平均熱排出量にエネルギー種別ごとに24時間の消費量時間変動比を乗じれば、エネルギー種別消費量の時間変動を計算することができる。電力や都市ガスなどの使用量の時間変化は、気象など様々な要因によって影響されるため、時間変動比を決めるにあたっては、既存の時間変動のデータを参考に平均的な24時間の時間変動曲線を仮定して計算を進めた。

A) 電力 東京電力の電力供給量の24時間の時間変動は、年間のピーク発生日（7～8月の夏期）について公表されている。ただ、これは東京電力の全管轄の範囲についてであり、東京都のみを対象としたものではない。ただ、上述の資料¹³⁾ に、東京都の区部と都心について1983年8月時のピーク発生日の時間変化を調査した結果があり、それをもとに時間変動比を設定した。

B) 都市ガス 都市ガスの時間変動比は、東京ガスの過去5年間の8月の平均時間変動のデータをもとに時間変動比を設定した。

C) 石油 石油製品は種類によって用途が異なり、それに応じて当然時間変動も違ってくる。まず、ガソリンと軽油（交通用）は、乗用車、トラックなどの燃料として消費されるので、自動車交通量の24時間の時間変化をもとに計算を進めた。この交通量の時間変化については、東京都の「交通量調査報告書—道路交通センサス—」（昭和60年度、東京都建設局）における平日24時間自動車類交通量の調査をもとに国道の交通量を対象に平均的な時間変動比を設定した。また、重油、軽油、灯油については、各々の用途別使用量を調査し¹³⁾、産業用は時間的に一定、交通用は交通量時間変化をもとに、民生は都市ガスに準じ、いずれも用途による比例配分で時間変動比を設定した。

D) 人体からの発熱 人工熱発生源として原単位は小さいが人体からの発熱がある。この発熱量については、昼間人口と夜間人口を調べ、午前9時と午後9時を境に時間変動を求めることにした。

以上、A)～C)の各エネルギー種別ごとに24時間の時間変動比を計算あるいは仮定し（図-4）、この変動比を予め算出した1990年8月の都心4区および23区のエネルギー種別平均日消費量に乗じて人工熱排出量の時間変動を計算し、それらを合計して全体の人工熱排出量の時間変動を求めた。

4. 2 計算結果と考察

上述の方法による計算結果を図-5に示した。人工熱発生量の時間変動として、区部、都心部ともに昼間の増大、夜間の減少のパターンであるが、特に都心4区では、昼間で 140 W/m^2 、夜間でも最低 50 W/m^2 前後

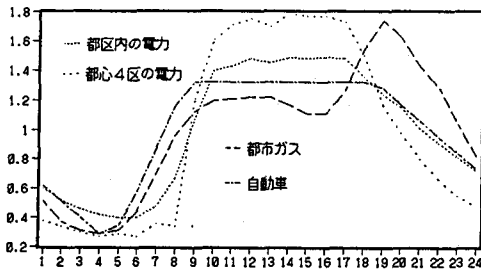


図-4 エネルギー種別の時間変動比

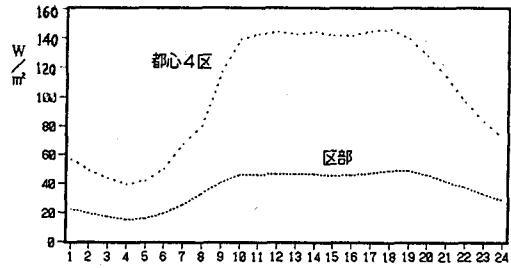


図-5 人工熱発生量の時間変動

の大きな人工熱の排出が見られる。この都心の密度の高い排熱は、エネルギー種別のうち電力、特にオフィスビルなど一般建物における電力の寄与が大きく、これは図-4の都心の電力の時間変動比からも明らかである。ただ、昼間は、道路舗装面やコンクリート建物など地表面の熱特性に起因する顕熱の量が大きく、人工熱排出量のヒートアイランド現象への寄与という点では、その比重は相対的にやや小さいと言える。むしろ、問題にすべきは夜間の排出熱である。特に、午前0時から明け方までの人工熱排出量は、都心で最低でも $40\sim 50\text{W/m}^2$ 、区部の平均では 20W/m^2 前後という値である。これらの数値は、都心4区や23区という範囲にわたる平均値であり、人工熱発生源の近傍の平均値で考えればより大きな排出熱量になる。2.2で行ったように宅地、一般建物、道路の実面積当たりの量で考え、これらの用途別土地利用からの熱排出量の比を1987年の年平均値と同様であると仮定すると、都心4区を例にとれば、宅地： $21\sim 58\text{W/m}^2$ 、一般建物： $89\sim 248\text{W/m}^2$ 、道路： $44\sim 124\text{W/m}^2$ という値が得られる。この計算のように昼間も夜間もこれらの用途別土地利用区域から同じ比で人工熱が排出しているという仮定にはやや無理があるが、これらの計算結果は人工熱のヒートアイランド現象への寄与を考えるうえで参考になると思われる。

5. 結 論

本研究から、以下のことが明らかになった。

- (1) 東京都の年人工熱排出量を、その地域分布や用途別排出量も含めて、原単位法により計算し、 $2.08 \times 10^8 \text{Gcal/yr}$ という値を得た。また、エネルギー種別の供給販売量からも東京都の年人工熱排出量を計算し、 $1.94 \times 10^8 \text{Gcal/yr}$ という値を算出した。
- (2) 従来の原単位法では、人工熱排出量の計算結果の検証ができなかったが、本研究では、(1)のとおり、異なった方法により計算した結果を比較することにより、より精度の高い計算結果を得ることができた。
- (3) 人工熱排出量の時間変動については、これまで建物をベースにした調査は行われてきたが、エネルギー種別ごとの消費時間変動比を仮定することにより、本研究では、夏期における地区別の熱排出量の時間変動を明らかにした。特に都心4区で夜間最低値で 50W/m^2 前後の高い値が得られ、地表からの顕熱がほとんどなくなる夜半から明け方にかけての人工熱の熱帯夜への寄与が明らかになった。

参 考 文 献

- 1) 守田 優, 諸橋敏夫: 一次元熱収支モデルによる都市地表面の熱収支解析, 第44回土木学会年講概要集
- 2) 守田 優, 菊地国明: 東京の人工熱排出構造について(第1報), 第45回土木学会年講概要集
- 3) 尾島俊雄, 根津浩一朗: 都市の熱消費, 熱排出構造に関する研究(その1), 日本建築学会論文報告集第236号(1975年10月)

- 4) 住環境計画研究所：昭和62年家庭用エネルギー統計年報.
- 5) 東京電力：大型ビルにおけるエネルギー使用の実態，地域開発ニュース，No. 94, 1975年.
- 6) 日本エネルギー経済研究所：事務所ビルにおける床面積あたり電力消費量の推移，地球時代のエネルギー新潮流（通商産業省編，1992年）.
- 7) 東京都水道局：昭和62年事業年報，1988年12月.
- 8) 東京都下水道局：昭和62年事業年報，1988年12月.
- 9) 東京都建設局：東京都の自動車交通の実態－昭和60年度自動車起終点調査より－，1987年12月.
- 10) 運輸省運輸政策局情報管理部：運輸関係エネルギー要覧（平成4年版），1992年5月.
- 11) 尾島俊雄：熱くなる大都市，NHKブックス，1975年.
- 12) 東京都統計年鑑：東京都総務局統計部，昭和62年版，昭和60年版.
- 13) 東京都におけるエネルギー需給構造とその将来動向に関する調査：東京都生活文化局，1987年3月.