

(4) 都市の人工熱排出構造について
—日本の8大都市を対象にして—

STUDY ON HEAT EXHAUST STRUCTURE OF MAJOR CITIES IN JAPAN

守田 優*

Masaru MORITA*

ABSTRACT; This paper studied the heat exhaust structure in urban areas in Japan. Heat exhaust increase with land use change caused heat island phenomena in the cities. First we investigated the heat exhaust load per unit activity of various energy consumers such as houses, office buildings, factories and automobiles. Then we determined the values of heat exhaust loads through analysing the statistics regarding energy use in the eight major cities and then proposed the method for evaluating total heat exhaust from all of the activities in cities. Second we calculated for these cities the heat exhausts from five sections of energy use: households, buildings, factories, waste treatment facilities, transportation system and also discussed the energy use characteristics of the eight major cities in Japan.

Key words; heat exhaust, heat island, urban environment

1. はじめに

都市域において排出される人工熱は、産業、交通などの諸活動に起因するものであるが、都市の基礎指標、例えば夜間人口、オフィス床面積、産業別従業人口などによってその都市から発生する人工熱排出量を推定できれば、現在の人工熱排出構造を明らかにできるだけではなく、将来の土地利用やエネルギーシステムの変化に伴う人工熱排出量を予測することもできる。また、人工熱排出量を推定する場合の基礎となる人工熱排出原単位そのものについて、既存の統計資料をもとに整合性のある妥当な値を設定することは現在の都市熱環境の解析のためにも必要であると考え。筆者ら^{1) 2)}は、すでに東京を対象にその人工熱排出量を原単位法と実績消費量換算法の二通りの方法で計算し、クロスチェックによってその計算法について検討した。ただ、これらの論文で、マクロ的にある程度の整合性は得られたものの原単位の設定においてさらに詳細な検討が必要と思われた。

本研究では、都市の人工熱排出構造、特にその原単位について家庭用、業務用、工業用などそれぞれ部門ごとに、過去のエネルギー消費量の推移や都市間のエネルギー消費の相違も踏まえながら比較分析を行った。さらに、そこで設定した熱排出原単位と既存の資料にある都市の基礎指標をもとに日本の8大都市を対象に人工熱排出量を算出した。そしてこれらの都市の人工熱排出特性ならびに日本の大都市の平均的な熱排出指標についても考察した。

* 芝浦工業大学工学部土木工学科 正員 港区芝浦3-9-14

2. 人工熱排出原単位

人工熱排出原単位について検討するとき、基礎指標としてなにを選択するかが重要である。例えば業務用の熱排出原単位の場合、基礎指標として従業員数と延床面積の二つが考えられるが、その選択において考慮すべき点として、一つはもちろん相関の高さが重要であるが、いま一つは統計資料として整っているという点も無視することができない。また、原単位の利用目的として、都市内部の人工熱発生量の分布の計算もあり、都市内部の地域的な特性を表す指標として利用しやすいものであることも不可欠である。本研究では、各都市の資料の整備水準も考慮して国内平均の原単位をベースに検討した。

2. 1 家庭用熱排出原単位

家庭用のエネルギー消費量の原単位については、基礎指標として、延床面積、世帯数、あるいは人口の3通りが考えられるが、地方都市と東京などの大都市では一戸建てや高層マンションなど住居の構造が異なるため、まず延床面積単位の原単位は適切ではない。また、家族生活という単位でエネルギーの消費を考えると、人口よりむしろ世帯数を指標とした原単位が合理的である。一般のエネルギー統計で世帯当たりの原単位が採用されているのもそのためであろう。

図-1にオイルショック前の1965年から1991年までの世帯当たりの家庭用エネルギー消費原単位の推移を示した³⁾。1980年前後に一時減少するが全体として増加傾向にある。図-1には、用途別の原単位も併記した。近年、クーラーの普及によるエネルギー消費の増大が言われ、確かに増加傾向が明らかであるが、動力他に比べ家庭用全体に占める割合が年平均で見ると小さく、さほどの影響はないように見える。ただ、夏期の高温日に集中するクーラーの人工熱排出の評価には、本論文のような年平均の原単位ではなく、季節変化を考慮した原単位が必要になる。

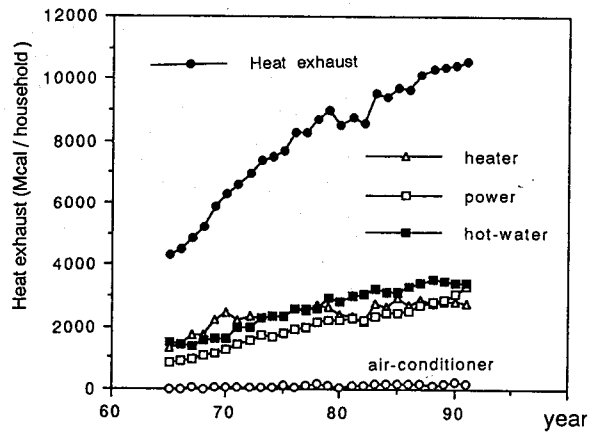


図-1 家庭用エネルギー消費量の推移

さて、家庭用エネルギー消費の原単位であるが、前年の論文では9400Mcal/year 世帯を採用したが、図-1から1989年前後の値として10,400 Mcal/year世帯程度であることがわかる。人口当たりの原単位として3 Gcal/year 人という値が報告されている⁴⁾が、1世帯あたり平均3人余りという現在の家族を考えると、ほぼこの程度の原単位の値は妥当であろう。ただ、札幌のように冬期の灯油の多量の使用が原単位そのものを押し上げているケースもあり⁴⁾、このような場合、別の方法で原単位を設定する必要がある。いずれにしろ、家庭用のエネルギー消費原単位は上昇傾向にあり、今後の生活様式の変化によっては変化の可能性は大きく、その適用には注意を要する。

2. 2 業務用熱排出原単位

家庭以外の一般建物から排出される業務用の熱排出原単位は、一般に延床面積当たりで算定されている。この部門では、建物の種類によって原単位の値や経年的な変化に特徴がある。図-2は、国内の各業種別の原単位の推移を家庭用と同じく1965年から1991年まで示したものである³⁾。事務所、デパート、卸小売、学校は第1次オイルショックの1973年前後まで漸増し、以後ほぼ安定した値となっているが、娯楽施設（ここでは劇場、映画館、ホールなど）は特に1980年代にはいって顕著な増加傾向を示している。一方、飲食店、ホテル、病院などエネルギー多消費型業種では、1973年以後減少傾向を示し、この数年やや増加傾向が見られる。前論文では、業務部門全体の伸び率1.5を設定し、第1次オイルショック直後に調査された各業種の原単位にその伸び率を一律に乗じて業種ごとの原単位を決めた。しかしこの図-2から明かなように、

業種ごとに伸び率が異なる上、業務部門全体の平均でも、第1次オイルショック時以降、横這いということがわかる。近年、オフィスのエネルギー消費の増加が指摘されていることを考えると、矛盾する印象を与えるが、これは、エネルギー種別の消費構造の変化として説明できる。図-3は、業務部門の電力と石油の単位床面積あたりのエネルギー消費量、とくに前者について冷房用と動力他を示したものである³⁾。これから明らかなように、全体の傾向として、石油がオイルショック以降減少傾向を示しているのに対して、電力は顕著な増加が見られ、これらが相殺して変動を小さくしていると言える。電力については、その内訳として、動力他の用途が著しい伸びを示している。これは、この間のOA用電力量の増加を反映したものとと言える。これと対照的に、冷房用の電力量は1975年以降ほぼ横這いである。

以上、業務部門の原単位について、用途別、エネルギー種別に検討したが、業務用の熱排出原単位を考える場合、図-2からその業種を区別して設定することが必要である。表-1に1989年の業務用熱排出原単位を示した。

2. 3 製造業熱排出原単位

製造業の熱排出原単位は、2.2の業務用と同様、業種による違いを考慮し、業種ごとに値を設定した。ここでは、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。基

礎指標としては、従業員数、生産額の2通りが考えられる。敷地面積も無視できないが、従業員4人程度の小規模の工場についての統計が不十分である。そこで、図-4に代表的な2業種について2種類の原単位を都市別に示した。この計算で、エネルギー消費量は「昭和64年石油等消費構造統計表（商鉱工業）」（平成2年・通商産業省）のデータを用い、2種類の基礎指標は、「大都市比較統計表」（平成2年・大都市統計協議会）をもとにした。図-4から、同じ業種であっても都市によって、変動があることがわかる。ここでは、基礎指標のデータの得やすさを考慮し、従業員数あたりの原単位を8つの都市で平均し、各都市とも同じ原単位を採用することにした。

以上の推計は、従業員数30人以上の事業所を対象としており、この結果を厳密には従業員数4人以上の事業所まで拡張することには問題が残るが、本論文では両者とも同じ原単位を用いた。

2. 4 供給処理施設熱排出原単位

供給処理施設としては、ゴミ焼却施設及び下水道を対象とした。まず、ゴミ焼却施設の原単位は、基礎指

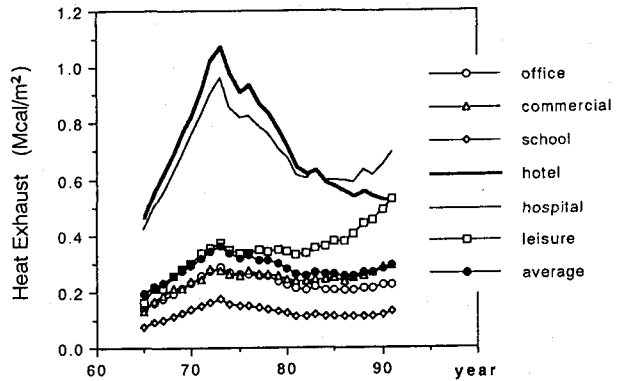


図-2 業務用エネルギー消費量の推移

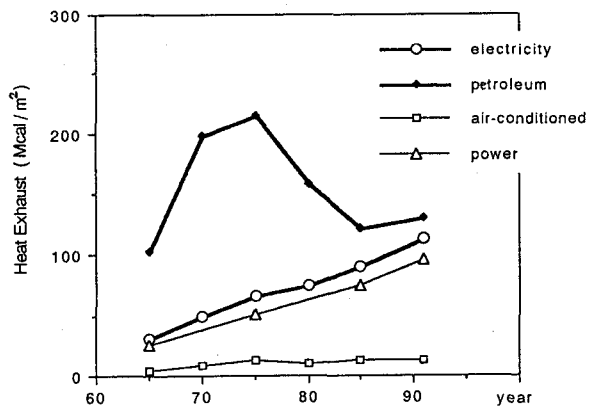


図-3 業務用エネルギー消費の内訳

表-1 一般建物の用途別熱排出原単位 (GCal/m²·yr)

事務所	商業施設	学校	病院	娯楽施設	ホテル	その他
0.22	0.26	0.13	0.70	0.53	0.53	0.40

標をゴミ焼却量とした。ただこの熱排出原単位は、焼却炉の性能によって異なり、新しいものほど設計最高発熱量は大きい。東京都を例に都内14の清掃工場の熱排出原単位を見ると⁵⁾、1,200～2,700 kcal/kgとかなりのバラツキが見られる。ここでは、平均的な値として、1580kcal/kg を設定した。ゴミ焼却量は各都市とも資料としてデータが得やすい。ただ、都市内部の人工熱排出量の分布を求めるときは、焼却炉ごとの原単位を採用すべきであろう。また、下水道については、下水処理場ごとにデータの得やすい受電量を熱量に換算する方法をとり、下水処理場の処理水量当たりの受電量⁶⁾から原単位を設定した。ここでは、東京都の平均値として、0.347kwh/m³とした。ここでも東京都内の下水処理場の原単位は0.22～0.49 kwh/m³と、ゴミ焼却と同様バラツキが大きい。将来的には、より高度な処理に伴う原単位の増加も予想される。

2. 5 交通運輸熱排出原単位

交通運輸部門の熱排出原単位は、自動車類及び鉄道類からなる。

(A) まず、自動車類は走行距離を基礎指標とする原単位を採用した。これはデータの得やすさを考慮したものである。ただ、こうして原単位を求めようとしても、車種ごとに排出原単位が異なるため、基礎指標である走行距離も原単位に対応させて車種ごとに集計する必要がある。ここで、熱排出原単位の一例を表-2に示した。車種によって異なるのはもちろんであるが、実際のところ、車種の分類法や、資料の整備状況も対象とする都市によって異なるため、原単位の設定においては、大枠の分類に基づいてその値を設定した。こうして、貨物車類、乗用車類の二つのカテゴリーに分け、前者を2500kcal/km、後者を930kcal/kmとして熱排出原単位を設定した。

(B) 鉄道類については、自動車類と同様走行距離当たりの原単位

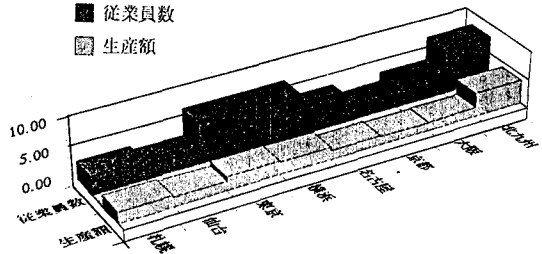


図-4 (1) 製造業 (食料品) の原単位

(従業員数: 10³Gcal/y人, 生産額: Gcal/円)

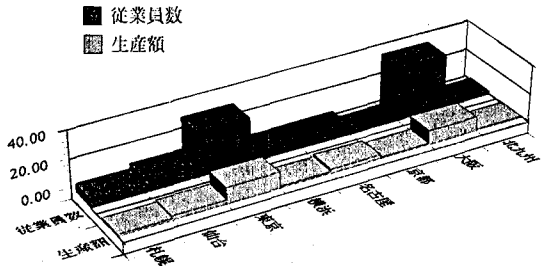


図-4 (2) 製造業 (パルプ) の原単位

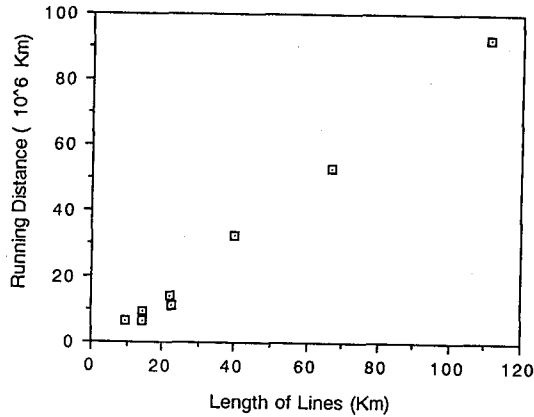


図-5 鉄道営業キロ数と車両走行距離の関係

表-2 自動車類の熱排出原単位⁸⁾

旅 客			貨 物		
営 業 用			自 家 用		
乗合バス	貸切バス	乗用車	バス	乗用車	軽自動車
2,946	2,805	1,053	1,516	885	641
			普通車		
			小型車	軽自動車	
			2,313	1,090	725

(KCal/km)

を採用した。ただ、走行距離は、都市ごとのデータとして整理されていないことが多く、また、列車走行キロと車両走行キロの2種類がある。そこで、データの得やすさや人工熱発生量の地域分布の計算への適用などを考慮し、直接、路線長と対応する営業キロを走行距離の代わりに基礎指標として用いることにした。図-5は、「都市交通年報」（平成2年版・運輸経済研究センター）から8大都市の地下鉄を例に営業キロと車両走行距離の関係を示したものである。この図から、両者の相関は極めて高く、営業キロから熱排出量を算定することが可能と思われる。この営業キロ当たりの熱排出量原単位の設定のためには都市の車両走行距離と電力使用量の詳細な分析が必要であるが、本論文では、暫定的に、東京都の1989年度の鉄道用電力使用量 1720×10^9 Kcalと都内の営業キロ数の合計、約1042 Km から、年 1.7×10^9 Kcal/km という原単位を採用することにした。

2. 6 人体発熱原単位

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。

3. 原単位法による8大都市の人工熱排出量の算定

原単位法では、消費用途別に原単位を設定してそれに基礎指標を乗じて人工熱発生量を計算する。この計算の基準年は1989年とする。以下に、基礎指標の求め方を用途別に述べ、計算結果を最後に示す。

3. 1 住宅、業務施設、商業施設に代表される生活施設

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（住宅以外の建物）に区別して集計した。

(A) 住宅 住宅は、各都市の「統計書」や「統計年鑑」より得られた基礎指標の世帯数に2.1の原単位10,400Mcal/世帯を乗じた。

(B) 一般建物 一般建物については、事務所、商業施設、ホテル、学校、病院、娯楽施設、その他の7種の施設に細分類した。基礎指標である延床面積のデータは都市によって資料の整備水準が異なり、東京区部は固定資産課税台帳をもとにしたデータがあり、横浜市、北九州市も「統計年間」が資料として比較的整っていたのでこれを用いて推計した。こうして、これら3つの都市については、上述の7分類の延床面積を求めることができた。

さて、残る5つの都市であるが、これらの都市については、「大都市比較統計表」（大都市統計協議会）にある指標を用いて推計した。まず、学校の延床面積は、既知の3都市の延床面積をもとに学校総数（幼稚園、小学校、中学校、高校、短大、大学の合計）の比率によって比例計算した。病院の延床面積は、同様に病床数の比率によって算出した。次に娯楽施設であるが、娯楽場数あたりの延床面積を計算すると、東京区部と横浜・北九州とで平均2.5倍程度異なった。そこで、他の都市では、後者の単位延床面積を用いて娯楽施設の延床面積を求めた。また、事務所、商業施設、ホテルの延床面積は、同じ「大都市比較統計表」の建物の床面積総数とこれらの3種類合計の床面積との比率を計算してみたところ、東京が0.1520、横浜が0.1265、北九州が0.1024となった。結局この3つの都市以外の都市の延床面積は、産業の構造を考慮し、これらの数値を使って計算した。札幌と京都は、横浜と北九州の平均値、仙台は北九州、名古屋は横浜、大阪は東京、横浜の平均の比率でこれらの用途の合計延床面積を算出した。次に東京、横浜、北九州の事務所と商業施設とホテルの比を計算すると、東京が77:16:6、横浜が54:28:18、北九州が54:40:6であった。そしてこれらの比を用いて、上述と同様の都市の対応を考慮して事務所と商業施設とホテルの延床面積を計算した。

3. 2 工場に代表される生産施設

生産施設の熱排出量は2.3のとおり、日本標準産業分類F製造業の分類に基づく原単位に基礎指標である従業者数を乗じて求める。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併用の工場という可能性が強いと考えられるので住宅として扱った。基礎指標の従業員数は、各都市の

「統計書」、「統計年鑑」（各都市）で調べた。

3. 3 供給処理施設

基礎指標のゴミ処理量、下水処理量は、「大都市比較統計表」及び各都市の「統計書」、「統計年鑑」で調べた。

3. 4 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て計算した。

(A) 自動車類は基礎指標として走行距離を用いた。ただ、都市によっては自動車の走行距離に関するデータが直接得られないので合理的な手続きによる推計を行う必要がある。そこで、まず、乗用車類及び貨物車類の登録地別（都道府県別）の走行距離データを「自動車輸送統計年報」（運輸省・平成元年）により求めた。そして5大都市府県別：業態別：車種別走行キロを各都道府県の車両保有台数で割り、1台当たり走行キロを計算し、「大都市比較統計表」にある各都市の車両保有台数を乗じて各都市の走行キロとした。ここで、データがない都道府県については、上述の5大都市府県から推計した。

(B) 鉄道類の基礎指標である営業キロについては、「大都市比較統計表」に都市ごとの営業キロが整理されているのでそのデータを用いた。

3. 4 人の行動による人体からの発熱

人の発熱は、人体からの発熱の原単位120kcal/hr人 に昼間人口、夜間人口をそれぞれ12時間ずつ乗じて1日の人体からの発熱とする。それを年間に換算したものを年間の熱排出量とする。ここで昼間人口とは、ある地域に定住する人口にその地域へ通勤または通学で流入する人口を加え、さらにその地域から通勤または通学で流出する人口を差し引きした人口である。したがって、昼間人口には買い物や行楽などのための一時的理由による流入、流出人口は含まれない。

4. 日本の8大都市の人工熱排出構造

以上の原単位及び基礎指標に基づき8大都市の人工熱発生量を用途別に計算した。ここでその結果を示し、考察を行う。

4. 1 原単位法と実績消費量換算法との比較

ここで、2. および3. に示した原単位法による計算、特に原単位の設定や基礎指標の正確さなどをチェックするため、前論文¹⁾と同様、エネルギー種別の年間販売量や供給量から原単位法とは独立に人工熱発生量を求め、それと原単位法の結果と比較した。この計算の対象としては、資料が比較的整っている東京都を選び、その人工熱発生総量で比較することにした。ただし、交通関係の消費量、特に販売と消費とで場所が異なる自動車類については、トリップ調査を参考に、交通の実態に即した補正を行い、ガソリンの販売量に0.90、軽油については0.95を乗じて消費量とした。こうして、このエネルギー消費量をもとに行った1989年を基準とした人工熱発生量の計算結果は、東京都全体の人工熱発生量として、 2.14×10^8 Gcal/yearとな

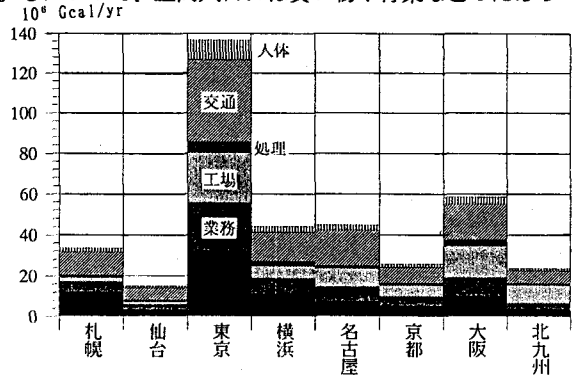


図-6 8大都市のエネルギー消費量と用途別内訳

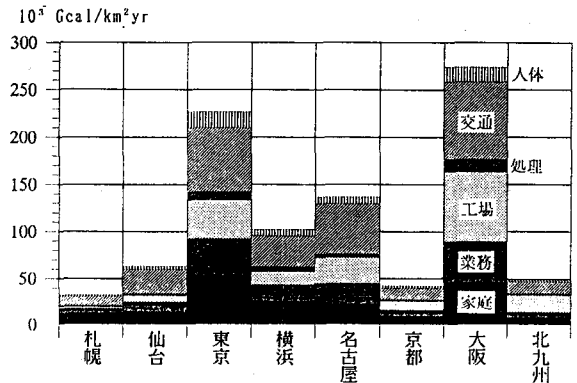


図-7 8大都市の単位面積当たりのエネルギー消費量

った。一方、原単位法で計算した結果は、 1.85×10^8 Gcal/year である。約14%の誤差で、原単位法の計算結果が小さい。この原因として、この原単位法の計算では、建設用、通信用の電力消費や火力発電所の重油消費など評価しにくい項目をカウントしていないためと考えられる。

4. 2 各都市の人工熱排出特性

図-6に各都市のエネルギー消費量とその用途別内訳を示した。全体の消費量では、東京23区が圧倒的に多く、次が大阪となった。また、最も小さいのは仙台市で、北九州、京都がそれ

に続いている。用途別の内訳で目立つのは、東京区部、横浜、札幌で家庭用・業務用という生活系エネルギー消費が40%を越え、北九州が逆に30%を下回っていることである。札幌の生活系のシェアが高いのは、冬の多量の灯油の消費のためであり、東京区部や横浜のそれが高いのは業務の一極集中を背景としたエネルギー消費のためである。また北九州は、生活系が低いぶん工業用のシェアが高く、歴史的にも工業都市としての性格が強い。そのことが消費特性に現れている。

次に、単位面積当たりの人工熱排出量を図-7に示した。都市生活や都市業務活動の平均的なモデルを想定するならば、家庭用、業務用という生活系のエネルギー消費密度は、人口密度と最も相関が強いはずである。しかし、一方、工場用や交通用、特に前者は人口密度との相関が薄いため、エネルギー消費密度の特性はこれら生活系と産業系に構成によって考察できる。例えば、東京区部と大阪は、人口密度はほぼ同じ（東京：1.3万人/km²，大阪：1.2万人/km²）であり、そのため生活系の消費密度はほぼ同じである。しかし、産業系のシェアの高い大阪が全体として高いエネルギー消費密度を示している。同様に、横浜と名古屋も人口密度はほぼ同じであるが、産業系のシェアの高さにより、後者の消費密度が高いと言える。

最後に、図-8に世帯当たり及び人口当たりのエネルギー消費量を示した。都市間の変動を見ると、両者の間でそれほどの違いはない。人口当たりで15~23Gcal/人年という値となっているが、人口と直接関係する生活系エネルギー消費に限定して人口当たりの消費量を計算すると、札幌という特殊例を除き、12~16 Gcal/人年となり、より変動幅は小さくなる。

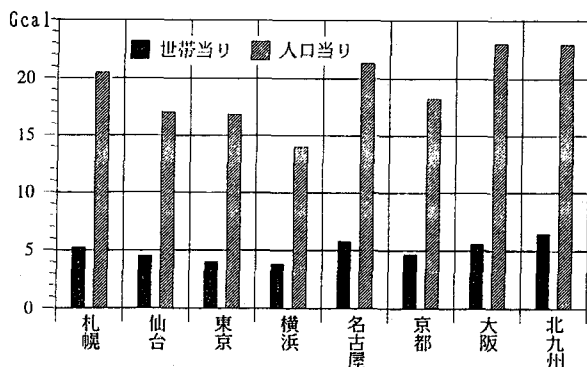


図-8 人口及び世帯当たりのエネルギー消費量

5. ま と め

本研究をまとめると以下になる。

1) 人工熱排出量を算定するために必要な原単位と基礎指標をエネルギー消費部門ごとに検討し、データを得やすい基礎指標に対応した原単位の値を設定することができた。その妥当性については、東京都を対象にエネルギー実績消費量とのクロスチェックにより15%程度の誤差で収まった。

2) 原単位を既存の資料から求めるとき、都市による地域差や経年的な変化を無視することができない。また、部門ごとに原単位の信頼性にムラがあり、特に、製造業については、同じ業種でも都市間の原単位の差が大きく、従業員数や工場の規模なども含めた検討がさらに必要となろう。また、業務部門では、延床面積を基礎指標としたが、業種によってエネルギー消費特性に違いがあるため、人工熱の排出量の算定においては業種ごとの原単位を用いるべきであろう。ただ、原単位として妥当な値が設定されても、基礎指標である延床面積の推計には今後改良すべき点がある。

3) 8大都市のエネルギー消費特性の比較では、人口をベースにした生活系のエネルギー消費と人口とやや相関の弱い産業系のそれとに分けて論じた。エネルギー消費密度は基本的には人口密度を反映したものであり、さらに産業系のエネルギー消費がその都市の特徴を表すと考えることができる。

今後の課題として、原単位及び基礎指標の信頼性をあらゆる業種ごとにできるだけ一定のレベルにする推計方法を考えるべきであろう。

なお、本論文の計算の一部に菅本清文君（現 東亜建設）の協力を得た。この場を借りて感謝する次第である。

参考文献

- 1) 守田 優, 竹内友昭(1992): 東京の人工熱排出構造とその時間変動について, 土木学会環境システム研究, Vol. 20, pp287-293
- 2) 守田 優, 竹内友昭(1992): 東京の人工熱排出量の時間変動について, 土木学会年次学術講演会概要集
- 3) エネルギー計量分析センター(1993): エネルギー・経済統計要覧, 日本エネルギー経済研究所
- 4) 平松直人, 花木啓祐(1992): エネルギー消費の大都市間比較, 土木学会, 環境システム研究, Vol. 20, p 252-261
- 5) 東京都清掃局(1992): ' 9 2 清掃のあらまし
- 6) 東京都下水道局(1991): 東京都下水道局年報・平成元年
- 7) 東京都統計協会(1991): 東京都統計年鑑・平成元年
- 8) 運輸省(1992): 運輸関係エネルギー要覧・平成4年