

(28) 細密地理情報にもとづく都市人工排熱の時空間分布の構造解析

Analyses on Geographical Distribution of Urban Anthropogenic Heat Based on Very Precise Geographical Information

一ノ瀬 俊明*・花木 啓祐*・松尾 友矩**

Toshiaki ICHINOSE*, Keisuke HANAKI*, Tomonori MATSUO**

ABSTRACT; With the energy statistics and very precise geographical information the very precise maps of energy consumption in Tokyo were drawn by the method of computer mapping. Computer graphics animation of the annual and diurnal variation of energy consumption in Tokyo was prepared with the calculation in the super computer. These outputs seem to be available as a scenario of anthropogenic heat exhaust, one of the surface boundary conditions for the numerical simulation model of atmospheric environment. The anthropogenic heat in the central Tokyo exceeds 400 W/m^2 in the daytime, especially the maximum value is $1,590 \text{ W/m}^2$ in winter. The hot water supply in office and hotel occupies 51%. In the suburban area the anthropogenic heat from household sector reaches about 30 W/m^2 in the nighttime.

KEYWORDS; anthropogenic heat, urban area, geographical information, Tokyo, computer mapping

1. はじめに

都市のエネルギー消費活動に伴う人工排熱は、アスファルト等地表面の人工的な被覆と並んでヒートアイランド等都市特有の局地気候に寄与しており、最近では数値シミュレーション¹⁾でもこのことが裏付けられている。都市におけるエネルギー消費構造の解明は、都市気候や都市開発の環境インパクトといった視点からも重要といえる。一方気象学の分野でも局地気象モデルの改良が進められ、100m程度のグリッド上での数値シミュレーション²⁾が可能となりつつある。都市構造や人間活動の制御がどの程度大気環境インパクトを軽減しうるのかを定量的に明らかにするためにも、地表面境界条件の重要な要素である都市人工排熱の詳細なデータを、ヒートアイランド等の数値シミュレーションに反映させていくことが要求される。本研究においては東京23区におけるエネルギー消費の時空間分布構造を詳細に記述し、局地気象モデルの地表面境界条件の高精度化に寄与することをその目的とする。

都市気候の研究において人工排熱が注目されたのは古く、G.R. Eatonは1877年にLondonにおける人工排熱量を燃料消費量より算出し、年平均気温にして 1.4°C の上昇をもたらしていることを指摘した³⁾。以来都市の人工排熱に関しては、太陽熱との量的な比較（例えばSchmidt⁴⁾など）や非都市域との比較についてのいくつかの研究例がある。また都市のエネルギー消費に関しても都市をマクロに捉えての解析例⁵⁾は多いが、空間分布構造までを議論した研究例は少ない。局地気象モデル地表面境界条件の人工排熱データとしてエネルギー消費をマッピングする場合は、メッシュデータ化されたものを用いることが望ましい。メッシュ毎の値で描かれたケースとしてはLund⁶⁾、札幌市⁷⁾、Tokyo¹⁾⁸⁾⁹⁾、仙台圏¹⁰⁾等があるが、具体的な推定プロセスを示していないものが多い。またこれに季節変化や日変化を加味した解析例はほとんどない。以上を踏まえ東京23区における1989年の人工排熱の時空間分布を求めた。

* 東京大学先端科学技術研究センター (Research Center for Advanced Science and Technology, The Univ. of Tokyo) , ** 東京大学工学部都市工学科 (Dept. of Urban Engineering, The Univ. of Tokyo)

2. エネルギー消費原単位の推定

2.1 東京23区におけるエネルギー消費構造

平松ら¹¹⁾は、1989年の東京23区におけるエネルギー消費を部門別・燃料種別のマトリックス (Fig.1) で表現したが、季節変化や日変化を表現するにはこのマトリックスを冷暖房や給湯等の用途にも分割する必要がある。EDMC¹²⁾は家庭部門及び業務部門について、1985年及び1991年における用途別・燃料種別原単位の全国平均値を推計しているほか、1965年以降毎年の用途別消費量 (全国合計値) を示している。1985年から1991年にかけて用途別の燃料種分担比は一定の割合で変化したものと仮定し、1989年における用途別・燃料種別のマトリックス (全国消費量) を作成した。また、部門毎に合計値を東京23区 (平松ら¹¹⁾) のそれと一致させることにより、東京23区のマトリックスを作成した。さらに、燃料種毎にその用途分担比を保存する形で、総消費量が平松ら¹¹⁾と一致するようマトリックスを修正した (Fig.2及びFig.3)。

家庭部門では給湯のウェイトが高く、主に都市ガスで賄われているが、業務部門では石油ボイラーが卓越する。家庭・業務ともに厨房はガス、動力は電力に依存している。また暖房については、家庭部門ではガストーブが普及しているが、業務部門では主に石油ボイラーに依存している。

2.2 業種別原単位の推定

(1) 各用途への分割

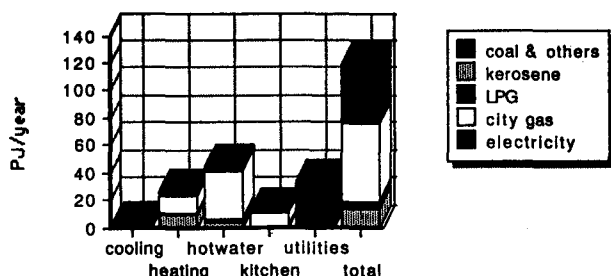


Fig.2 Energy consumption in household sector
Tokyo (1989)

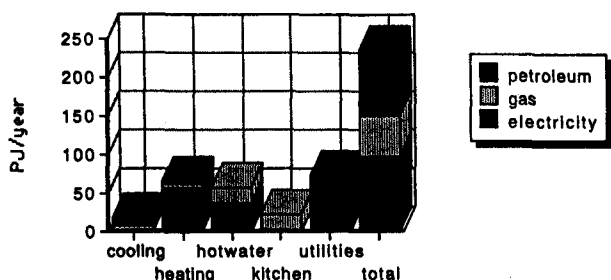


Fig.3 Energy consumption in commercial sector
Tokyo (1989)

city gas : LPG = 72 : 28 (gas)

kerosene : heavy oil = 35 : 65 (petroleum)

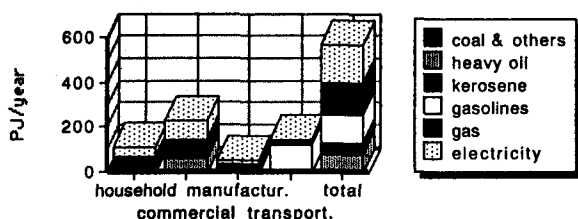


Fig.1 Energy consumption in Tokyo (1989)

Revised from Hiramatsu et al. (1992)

city gas : LPG = 76 : 24 (gas)

gasolines includes light oil.

gasoline : light oil = 61 : 39

(transportation sector)

平松ら¹¹⁾は業務部門の推計を、供給量の合計値からその他の部門の推計値を差し引く形でを行っているが、業務部門は様々な業種から構成されており、原単位の大きさや組成も多様である¹³⁾¹⁴⁾。都市構造や土地利用に関する地理情報をエネルギー消費のマッピングに反映させるためには、業種毎の原単位を求める必要がある。EDMC¹²⁾には、業種

(Tab.1参照) 毎に消費量と床面積の全国合計値が示されており、業種毎に単位床面積当たりの原単位 (1989年の全国平均値) を求めた。また (財) 日本エネルギー経済研究所¹⁵⁾は、1976年を基準として1983年までの業務部門における業種別・燃料種別の原単位を用途毎に推計しており、業種毎に1983年時点の用途分担比を用いて1989年の原単位を各用途に分割した。

(2) 床面積による補正

東京都都市計画局作成・昭和56年度及び昭和61年度東京都土地利用現況調査¹⁶⁾は、

25mグリッド毎の土地利用種、建物の有無、建築階数等を示しており、磁気化されている。1989年における土地利用種毎の床面積を、昭和56年度から昭和61年度にかけての伸び率を外挿して求めた。東京23区の合計値（宅地のみ）が50,044ha、交通部門のエネルギー消費が行われる場としての道路、鉄道等の敷地面積がそれぞれ10,119ha、1,535haと求められた（Fig.4）。

一方東京都都市計画局¹⁷⁾は、東京都土地利用現況調査にもとづいて1986年と1991年（註1）における東京23区の土地利用種別敷地面積を示している。1989年における敷地面積をこのデータから内挿した場合と比べ、前述の方法では事務所で約9%の過小評価となる。この時期はいわゆるバブル経済による好景気に当たっており、この種の床面積需要が急増したことが伺える。建ぺい率・容積率を不変とした場合、原単位を1割ほど過大に見積もってしまう可能性があるが、その他の土地利用種のほとんどにおいて2%以内の上下に納まり、宅地全体では両者が一致した。

東京都土地利用現況調査における土地利用種とEDMC¹²⁾の業種との間にTab.1に示す対応関係（註2）を仮定し、本研究における12種類のエネルギー消費カテゴリーを定めた。また、消費カテゴリー毎に集計され

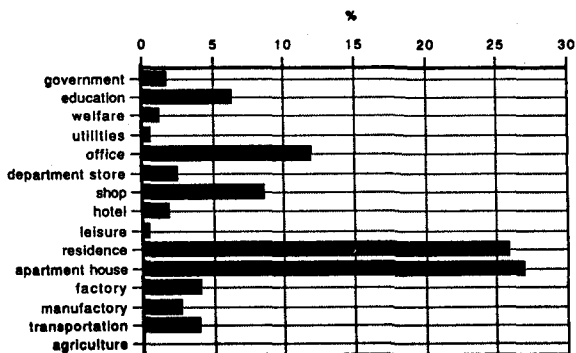


Fig.4 Square of floor in Tokyo (1989, estimated)
total: 50,044ha
(except road: 10,119ha and railway etc.: 1,535ha)

Tab.1 Data source of unit energy consumption (EDMC)

TMG (Land Use)	EDMC	This Research
Government	Office	Office
Utilities		
Office		
Transportation (half)		
Education	School 307 : Others 144 (averaged)	Education
Welfare	Hospital	Welfare
Department	Department	Department
Store	Store	Store
Shop (half)	Shop 276 : Restaurant 49 (averaged)	Shop
Hotel	Hotel	Hotel
Leisure	Amusement	Leisure
Residence	a)	Residence
Shop (half)		
Manufactory (half)		
Agriculture		
Apartment House	a)	Apartment House
Factory	b)	Industry
Manufactory (half)		
Road	c)	Vehicle
Railway	d)	Train

TMG: Tokyo Metropolitan Government (1986) --- Bureau of Urban Planning

EDMC: The Energy Data and Modeling Center (1993)

(half): half count

a) Hiramatsu et al. (1992)

--- Residence : Apartment House = 4 : 3 (unit cooling use)
= 13 : 7 (unit heating use) by TMG

b) Hiramatsu et al. (1992) --- manufacturing sector

c) Hiramatsu et al. (1992) --- transportation sector except electricity

d) Hiramatsu et al. (1992) --- electricity in transportation sector

た床面積（交通部門は敷地面積）を原単位に乗じて東京23区全体の用途別消費量を求め、用途毎の合計が前述のマトリックスに一致するよう各々の原単位を補正した。その際用途毎の業種分担比は保存されている。この補正により各消費カテゴリーの原単位は24~33%増加した。なお、業務部門における用途毎の燃料種分担比は業種を問わず不変（註3）としたため、燃料種毎に消費量をFig.3と突き合わせる必要はない。

守田ら¹⁸⁾は工業部門を23業種に分類し、それぞれについて原単位を求めているが、東京都土地利用現況調査には業種についての情報が存

在しないため、本研究においては各業種への分割を行っていない。札幌市の例⁷⁾では業種間で最大30倍程度の開きが見られ、最も大きい業種では年平均値で500 W/m²近くに達する。

(3) 東京23区におけるエネルギー消費の特徴

こうして求められた消費カテゴリー別・用途別原単位及び東京23区における消費量を、それぞれFig.5, Fig.6に示す。厚生医療施設及び宿泊・遊興施設においては給湯需要が大きく、原単位を大幅に引き上げている。暖房需要は厚生医療施設やスポーツ・興業施設において大きく、動力需要は専用商業施設等やスポーツ・興業施設で大きい。消費カテゴリーの定義にもよるが、守田ら¹⁸⁾の算出した業務部門の原単位に比べ、事務所や商業施設において2～3割減、学校、病院及び娯楽施設において3～5割増の値を得ている。一方23区全体の値では事務所が突出し、業務部門の約4割を占めている。

3. エネルギー消費を通じた都市活動のモデリング

3.1 季節変化・日変化の推定

東京都環境保全局¹⁹⁾には、建物規模・用途毎の熱負荷の季節変動・日変動が示されている。また大阪ガス(株)²⁰⁾には、総合研究開発機構(NIRA)等の機関で作成された同様のデータが収録されている。熱負荷とエネルギー消費は別

物であるがほぼ連動していると考え、通年の原単位自身は前章で推定されたものを用い、季節変化・日変化のパターンに従って各季節及び各時刻へと分割した。Tab.2に季節変化・日変化のパターンの出典を示す。前者が東京都において熱量計で実際に測定されたデータにもとづいているのに対し、後者は設計値をそのまま表示しているケースが多い。よって前者を優先的に選択し、暖房と給湯が分離されていないケース等について後者から補った。用途別・消費カテゴリー別の原単位の日変化から、主なものをFig.7～Fig.10に示す。

冷房(Fig.7)については昼間の需要がフラットである。宿泊・遊興施設は夜間にも需要が大きい。わずかではあるが家庭部門にも21時頃にピークが現れている。暖房(Fig.8)については、事務所の場合朝にピークがあり、日中ゆるやかに下っていくパターンである。宿泊・遊興施設ではチェックアウトからチェックインまでの時間帯が低くなっている反面、夜間の需要は大きい。家庭部門では朝晩の二峰型を示している。給湯(Fig.9)については、宿泊・遊興施設における朝のピーク、厚生医療施設における晩のピークが特徴的である。

なお、その他の用途については季節変化を与えていない。厨房については全用途に占めるウェイトが小さいこともあり、消費カテゴリー毎の特徴を考慮して適当なパターンを定めた。動力については、昼間の需要がフラットな形を示すことから冷房のパターンをそのまま用いた。また、工業部門については用途に分割しておらず、工業活動全般の平均的な消費パターン(通年一律)を仮定した(Fig.10)。交通部門についても同様である。

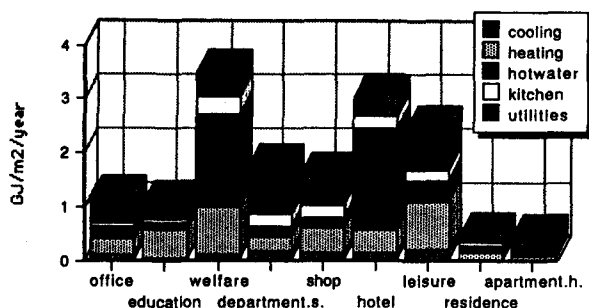


Fig.5 Unit energy consumption in each land use Tokyo (1989)

except Industry: 2.179 GJ/m²/year

Vehicle: 1.434 GJ/m²/year

Train: 0.918 GJ/m²/year

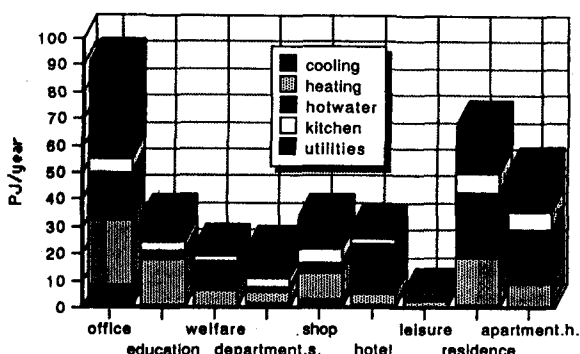


Fig.6 Energy consumption in each land use Tokyo (1989)

except Industry: 61 PJ/year

Vehicle: 145 PJ/year

Train: 14 PJ/year

Tab.2 Data source of loading curve (shape)

	Cooling	Heating	Hot Water Supply
Office	<--- TMG	TMG	--->
Education	TMG	<--- Office	--->
Welfare	<--- TMG	TMG	--->
		(hospital)	
Department Store & Shop	TMG (commerce)	<--- NIRA (depart.s.)	--->
Hotel	TMG	<--- NIRA	--->
Leisure	<--- CRS	& JGA	--->
		(sports club) (cinema hall)	
		averaged	
Residence	NIRA' (household)	<--- TMG (apart.h.)	--->
Apartment	NIRA' (household)	<--- TMG (apart.h.)	--->
House			

Kitchen: original curve
Utilities: Cooling

TMG: Tokyo Metropolitan Government (1991)
--- Bureau of Environment Preservation

The following data are summarized
in Osaka Gas Co.,Ltd. (1991)

NIRA: NIRA (1985)
CRS: Japan Co-generation Research Committee (1989)
JGA: Japan Gas Society (1988)
NIRA': NIRA (1985) revised by Tokyo Gas Co.,Ltd.

である。しかしながらこの鉄道敷地面積には空港・港湾施設が含まれており、地図を参照しての分離が煩雑であることや、地下鉄による消費分が陸上鉄道にカウントされてしまうことなど様々な問題がある。また東京都環境保全局¹⁹⁾によれば、地下鉄駅舎の冷房には事務所の2～3倍程度の需要(床面積当たり)が存在するが、やはりこれをマッピングすることができない。

3.3 人体・処理施設等の寄与

多くの文献において人体からの発熱量を100～140W/人²²⁾としている。国勢調査にもとづく500mメッシュ毎の昼間人口・夜間人口のデータが存在するが、人の移動パターンをメッシュレベルで推定することが困難であったため、今回は人体からの発熱量を計上していない。東京23区において5～10%前後¹⁸⁾²³⁾のシェアを占めるとの報告がある。また東京23区における供給処理施設からの発熱については4%程度と見積もられている²³⁾。鶴野⁷⁾によれば、札幌市における廃棄物焼却場からの排熱は1,121W/m²に達し、あらゆる土地利用種の中で最も大きい値となっている。しかしながら、東京都土地利用現況調査では供給処理施設から廃棄物焼却場を分けることができないため、

このようにして作成された消費カテゴリー別・季節別のデータをTab.3に示す。

3.2 交通部門における問題点

(1) 自動車交通

自動車交通によるエネルギー消費のマッピングについては、交通量の日変化の実測データ等を参照して行うのが望ましいが、交通量データを面的に入手することは困難であり、宅地同様道路面積に比例した消費がなされるものと考えた。しかしながら狭い道路で渋滞したような場合、交通流が円滑な高速道路に比べ単位道路面積当たりの排熱量が多くなり、「エネルギー消費は道路密度に比例する」という前提が成り立たない恐れがある。自動車交通に伴う人工排熱の内訳は80%がエンジン、排気系及び走行部品からの直接排熱であり、20%が速度エネルギーとして利用され、ブレーキング時に排出されるといわれており⁸⁾²¹⁾、久保²¹⁾はリモートセンシングによる路面温度の測定から、交通部門(自動車交通)による人工排熱分布を調べることを提唱している。

(2) 鉄道

自動車交通の場合同様敷地面積に比例した消費がなされるという仮定を行っている。これは守田¹⁸⁾が行った排熱量を路線長で比例配分する方法にも整合的

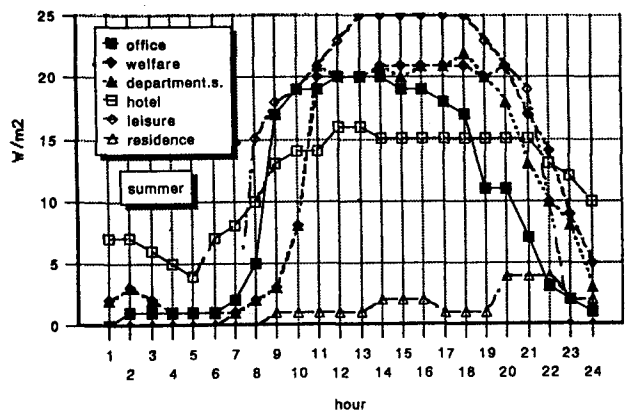


Fig.7 Diurnal variation of cooling use
Tokyo (1989)

やはり計上していない。そのほか火力発電所、建設現場等の取扱いの検討が今後の課題である。

3. 4 季節変化及び日変化の妥当性

守田ら¹⁸⁾は、東京の都心4区及び東京23区をマクロに捉えての季節変化・日変化を議論している。本研究においては季節変化・日変化を用途別に需要側のデータから決めているのに対し、燃料種別に供給側のデータから決めており興味深い。電力の供給パターン¹⁸⁾は動力(=冷房, Fig.7), とりわけ事務所や商業施設のものに類似しており、家庭・業務の両部門において電力のほとんどが動力に用いられている(Fig.2及びFig.3)ことや、事務所及び商業施設における動力需要が電力消費量全体の3割以上を占めることから説明しうるものと思われる。交通量の日変化については、本研究(Fig.10)では朝晩の交通ラッシュを表現しているが、守田ら¹⁸⁾が昭和60年度の道路交通センサス(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結果にもとづいて定めたパターンには考慮されていない。

4. 人工排熱のコンピューターマッピング

4. 1 エネルギー消費と人工排熱の関係

消費されたエネルギーは最終形態としての熱に変わることから、守田ら¹⁸⁾はエネルギー消費量が即ち人工排熱量であるとしている。本研究においても、次のような仮定のもとにこのような近似を行っている。例えば冷房時は室温が常に一定に保たれるものとし、室外に放出される熱をRH, 室外から侵入してくる熱をPH, 給湯・厨房・動力・人体に加え、空調機器のうち室内器の動力に用いられるエネルギーの合計をIE, 室外器の分をOE, 室内から奪って室外へ放出する熱をCHとした場合、室内から室外へ出る方向を正として次のような熱収支式を立てることができる。

$$RH = CH + OE \quad (1)$$

$$-PH = -CH + IE \quad (2)$$

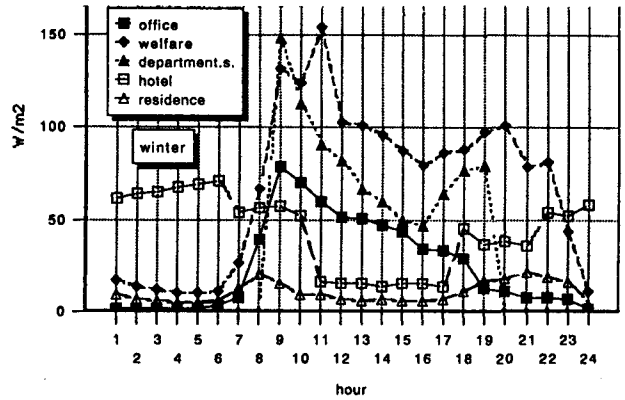


Fig.8 Diurnal variation of heating use
Tokyo (1989)

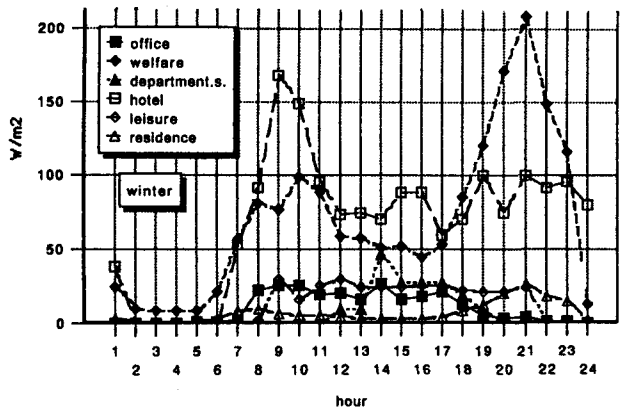


Fig.9 Diurnal variation of hot water supply
Tokyo (1989)

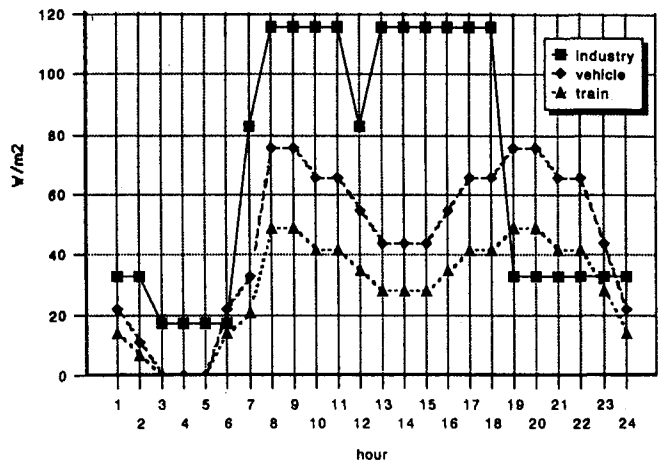


Fig.10 Diurnal variation of energy consumption
Tokyo (1989)
(industry and transportation)

$$\text{都市大気への排熱インパクト} = (1) + (2) = \text{OE} + \text{IE} \quad (3)$$

即ちエネルギー消費量をそのまま人工排熱量と考えることができる。

一般に各種エネルギー消費機器の熱効率は小型電動モーターで65～80%、小型ボイラーで65～70%、蛍光灯で18%、電球で10%といわれている⁸⁾。残りは直接的な人工排熱としてカウントできるが、モーターによる空気の振動や照明器具からの光が熱に変わるまでのプロセスを考えなくてはならない。とりわけボイラーで沸かされたお湯に閉じこめられている熱の挙動については、水を持つ熱容量の大きさ故にそれが室内へ散逸する場合の時間遅れや、下水道に排出される熱量についても考慮する必要がある。三好ら²⁴⁾が福岡市において行った調査によれば、家庭で消費されるガス及び深夜電力の37%に相当する熱が下水に入る。これを東京23区に当てはめるならば、給湯に用いられた熱の約5割が下水道に排出されることになる(Fig2参照)。また都市大気へのインパクトを考える上では、冷暖房機器の組み合わせによる顕熱・潜熱の配分の違いや、各種機器からの排熱の時間遅れについても考慮する必要があるが、本研究では残念ながらそこまで至っていない。

Tab.3 Diurnal variation of energy consumption in each type of land use.

W/m ² (h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	KJ/d	
Os	0	1	1	2	2	2	11	26	56	57	57	60	59	59	53	54	57	51	34	31	19	8	5	2	2537	
Om	1	1	1	2	2	3	11	34	63	60	58	58	56	58	49	48	53	45	28	25	15	7	5	2	2464	
Ow	2	3	3	3	4	5	18	72	132	122	110	103	99	103	85	79	84	70	39	34	21	13	11	3	4380	
Es	4	4	4	4	4	4	8	15	25	41	40	39	38	35	32	31	30	23	14	9	8	6	6	5	1540	
Em	3	3	3	3	3	4	10	29	51	60	55	51	50	46	40	37	36	29	15	11	8	7	7	4	2031	
Ew	6	6	6	6	6	8	22	87	164	161	142	126	122	117	102	87	85	71	34	27	19	17	17	6	5190	
Ws	19	11	10	8	8	14	61	78	78	77	121	103	102	75	76	72	101	122	139	171	161	118	89	18	6589	
Wm	27	15	13	11	11	21	78	111	128	124	164	126	124	93	91	84	117	144	172	142	07	156	114	20	8514	
Ww	44	26	23	20	20	33	109	174	232	229	209	205	170	162	148	188	223	265	320	306	245	170	301	3860		
Ds	7	8	8	5	5	3	4	6	9	28	86	89	89	107	96	98	99	97	86	74	60	48	39	11	4170	
Dm	6	7	6	4	4	3	3	5	7	22	72	78	78	108	91	93	94	88	76	63	51	41	34	9	3746	
Dw	5	6	6	3	3	2	3	4	15	41	132	149	150	133	166	135	134	151	157	145	51	40	32	26	8	6209
Ss	5	6	6	3	3	2	3	4	7	20	66	69	69	86	75	77	78	76	67	58	47	38	32	8	3251	
Sm	4	5	4	3	3	2	2	3	5	15	53	59	59	86	71	72	73	68	57	47	39	32	27	6	2850	
Sw	3	4	4	2	2	2	2	3	24	61	96	188	184	157	183	146	144	172	186	178	36	29	23	19	5	7346
Hs	40	14	12	9	8	12	68	99	158	133	110	96	98	79	91	91	85	93	114	95	113	101	102	77	6833	
Hm	47	14	12	11	11	13	76	112	183	154	118	99	100	81	97	97	86	98	124	101	123	112	115	88	7450	
Hw	106	71	71	72	72	77	129	171	251	214	140	117	118	97	116	116	102	143	165	141	164	168	171	147	11300	
Ls	0	0	0	0	0	0	1	32	67	65	88	111	105	106	108	96	105	105	96	95	90	32	3	0	4708	
Lm	0	0	0	0	0	0	13	106	89	75	96	113	106	106	107	94	106	106	99	100	97	33	4	0	5216	
Lw	0	0	0	0	0	0	44	94	278	329	228	328	282	192	202	228	153	224	198	127	133	133	45	6	012130	
Rs	2	1	1	1	1	2	7	9	8	5	9	9	10	8	9	7	9	12	14	26	31	22	15	8	812	
Rm	4	3	2	2	2	3	12	15	12	7	11	10	10	9	9	8	10	15	19	31	37	27	19	7	1020	
Rw	12	8	7	6	6	9	25	34	26	15	19	17	16	15	15	13	17	26	36	51	62	48	36	11	1911	
As	2	1	1	1	1	2	7	9	8	5	8	8	9	8	9	7	9	12	14	25	30	21	14	7	785	
Am	3	2	2	2	2	3	10	13	10	6	10	9	10	8	9	7	10	14	18	29	35	25	18	7	937	
Aw	8	5	5	4	4	6	18	25	19	11	15	13	13	12	12	11	14	21	29	43	52	39	29	9	1503	
I	33	33	17	17	17	17	83	116	116	116	116	83	116	116	116	116	116	116	116	33	33	33	33	33	5969	
V	22	11	0	0	0	22	33	76	76	66	66	55	44	44	44	55	66	66	76	76	66	66	44	22	3929	
T	14	7	0	0	0	14	21	49	49	42	42	35	28	28	28	35	42	42	49	49	42	42	28	14	2516	

O: Office, E: Education, W: Welfare, D: Department Store, S: Shop, H: Hotel,
L: Leisure, R: Residence, A: Apartment House, I: Industry, V: Vehicle, T: Train

s: July-August, m: April-May and October-November, w: January-February

4. 2 動画による表現

東京都土地利用現況調査のデータを250mメッシュに集計し、土地利用種別の床面積に応じて原単位を積み上げることにより、東京23区におけるエネルギー消費のマッピングを行うことができる。また、ある日における毎時の分布を連続的に表示することにより、エネルギー消費量（人工排熱）分布日変化のCGアニメーションを作成することができる。本研究で作成したアニメーションは、1989年における夏期、中間期、冬期のそれぞれの平均的な1日について、24時間の変動を連続的に表示するものである。1メッシュは250m四方であり、1時間は0.5秒で表現される。ここでは冬期を例に14:00 (Fig.11) 及び21:00 (Fig.12) について示す。凡例はフルスケールで400 W/m²である。14:00には業務機能の集積している都心において消費量が大きく、丸の内、新宿、渋谷、池袋の高密度地域や、皇居、代々木公園、荒川河川敷等の大規模緑地を容易に見出し得る。一方21:00には、周辺の住宅地域において昼間よりも消費量が大きく、都心の業務地域との差は縮まる。

都心における平均的な人工排熱量については Saitoh et al.⁹⁾をはじめいくつかの推定値があり、78~120 W/m²以上とされている。本研究ではメッシュレベルで求めているので、最大値としては新宿副都心の1,590 W/m² (9:00) が得られた。

その内訳は暖房34%，給湯51%，厨房5%，動力8%，自動車交通2%である。当該メッシュにはオフィスビル（48階）とホテル（47階）が1棟ずつ存在しており、これらの寄与率はそれぞれ31%，67%である。辻ら²⁵⁾を参考に、オフィスビルにおける1人当たりの床面積を15m²/人とする、このビルには15,750人



Fig.11 Distribution of anthropogenic heat in Tokyo (winter, 14:00)



Fig.12 Distribution of anthropogenic heat in Tokyo (winter, 21:00)

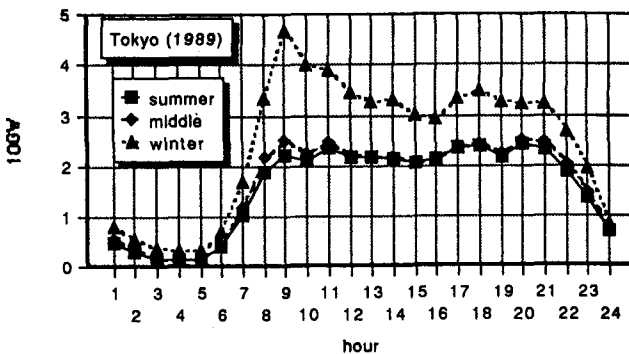


Fig.13 Diurnal variation of total energy consumption Tokyo (1989)

がいることになる。人体からの発熱量を100 W/人とする、このビルの敷地においては約76 W/m²に達する。人体からの発熱量は先に計上された人工排熱量の約5%と見積られたが、これは守田²³⁾等の結果とも整合する。また夏期においても同じ場所では908 W/m² (9:00) を計上し、冷房の寄与率は13%であった。藤野²⁶⁾はアスファルト舗装による顕熱輸送量は日中最高で350 W/m²に達するとしているが、これをはるかにしのぐ人工排熱が放出されていることにな

る。14:00の銀座や丸の内、新宿周辺には $400\text{ W}/\text{m}^2$ 以上の領域が広がる。一方21:00では住宅地域のうち、やや色の濃い部分が約 $30\text{ W}/\text{m}^2$ である。都心にも $100\text{ W}/\text{m}^2$ 以下の部分が目立つ。東京23区全体のエネルギー消費量の日変化 (Fig. 13) を見ると、冬期における朝のピークが顕著であるほか、日中から21:00にかけてほぼフラットなパターンとなっており、夕方から宵の口にかけてエネルギー消費の場が人の移動とともに都心から郊外に移動するものと考えてよい。

なお、本研究では1989年の原単位と1986年度の土地利用データを用いてマッピングを行っているが、この期間の原単位が年々増加しているとすれば、1986年における分布図としては過大評価となり、1989年における分布図としては前述したとおり、床面積の増加分に応じて過小評価となっている。

4. 3 消費部門毎の比較

都心におけるエネルギー消費はそのほとんどが業務部門のものであり、その分布図は全部門の合計をマッピングしたものに比べ、形態的な差は見出しにくいので省略する。以下に示す分布図においては、いずれも凡例のフルスケールを $50\text{ W}/\text{m}^2$ に統一した。家庭部門 (冬期, 22:00) では、鉄道沿線の濃密な地域や都心の希薄な地域を見出すことができる (Fig.14)。中川沿いの高層マンション (11階、墨田区立花) を含むメッシュ等において最大値 $173\text{ W}/\text{m}^2$ (21:00) を計上した。一方練馬区及び江戸川区等では $10\text{ W}/\text{m}^2$ 程度に過ぎない。こうした出力は熱需要分布に関する情報を与えてくれるので、地域冷暖房システム等の立地検討資料としても活用し得る。工業部門 (Fig. 15) は下町や湾岸に立地しており、交通部門 (Fig.16) は鉄道網や幹線道路網を反映した分布を示している。最大値としてはそれぞれ $161\text{ W}/\text{m}^2$, $63\text{ W}/\text{m}^2$ が得られるものの、郊外におけるウエイトとしては家庭部門に比べ小さい。

4. 4 局地気象モデル地表面境界条件としての有効性

本研究に用いられたような細密地理情報は、人工排熱のみならず大気汚染物質の排出の見積にも役立つ。またOke²⁷⁾の提唱した天空率 (sky view factor) や, Lettau²⁸⁾の粗度長, あるいは人工排熱の排出高等も、このような細密地理情報から加工し、その空間分



Fig.14 Distribution of anthropogenic heat in Tokyo (winter, 22:00, household)



Fig.15 Distribution of anthropogenic heat in Tokyo (14:00, industry)



Fig.16 Distribution of anthropogenic heat in Tokyo (8:00, transportation)

布構造を定量化することが可能である。北海道住宅都市部は「昭和55年度都市計画基礎調査」により、札幌市内全域を約100mメッシュに分割し、土地利用形態、敷地面積及び延べ床面積について記載している⁷⁾。鶴野⁷⁾は札幌においてこのデータを用い、200mメッシュ毎の粗度長を計算している。東京都をはじめこの種のデータ利用は容易ではないが、本研究に示すとおり、地表面の様々な特性、環境指標の分布解析には極めて有効なデータといえる。

5. 結論

(1) 東京23区における消費部門別、業種別、用途別、燃料種別のエネルギー消費原単位のデータセットを作成した。

(2) 原単位に季節変化・日変化を与え、季節、時刻に分割した。

(3) 細密地理情報をもとに、東京23区における人工排熱のマッピングを行った。またその季節変化・日変化をCGアニメーションの形に表現した。

(4) 昼間の都心には $400\text{W}/\text{m}^2$ 以上の領域が広がり、とりわけ冬期の新宿副都心において最大 $1,590\text{W}/\text{m}^2$ の排熱が計上された。その半分はオフィスやホテルにおける給湯によるものである。

(5) 住宅地域では21:00に最大となり $30\text{W}/\text{m}^2$ 前後に達する。

謝辞

データ解析を手伝って頂いた学生の濱田康裕君(現・(株)川崎製鉄)に感謝します。また土木学会・日本地理学会等を通じて温かい御助言を頂きました方々に感謝します。東京都都市計画局並びに下水道局のスタッフには東京都土地利用現況調査のポイントサンプリングデータの磁気テープを利用させていただいた。本研究を行うに当たり、東京大学大型計算機センターのスーパーコンピュータ・動画システムを利用した。また、平成4年度鹿島学術振興財団研究助成金「都市の熱容量・環境負荷容量と都市構造の関係に関する研究」(代表・一ノ瀬俊明)の一部を利用させて頂いた。本稿は日本地理学会1994年度春季学術大会、平成5年度環境科学シンポジウムで一部発表したものである。

註

1) 1991年度のデータはメッシュデータではないので、今回の使用は見送った。

2) 土地利用種のうち、2種類の消費カテゴリーが混在していると思われるものについては、床面積の半分を割り当てた。教育文化施設等、複数業種の床面積の存在比(全国)を重みとした加重平均を行って原単位を作成した消費カテゴリーもある。また、家庭部門における専用独立住宅と集合住宅の原単位(冷房及び暖房)の比(Tab.1参照)は東京都の熱負荷算定基準²⁹⁾による。

3) 業種別・燃料種別・用途別の原単位は1983年までのものしか存在しない。本研究では、1989年の原単位を推定するに当たり、1983年における業種毎の用途分担比を用いている。この場合補正の際には冷房需要の変化率(1989年/1983年)は、どの業種においても等しくなる。一方、用途分担比の代わりに燃料種分担比を用いる方法もあるが、結果は前者のものと一致しない。動力・冷房・厨房はほぼ単一の燃料種に依存していることや、燃料種毎の用途分担比が用途毎の燃料種分担比に比べ業種間で大きくばらついていること等から、後者では補正量が大きくなってしまうため適当ではないと思われる。また、ガス消費の変化率

(1989年/1983年)がどの業種においても等しいというのは不自然である。よってここでは、「用途毎の燃料種分担比は業種を問わず不変」という仮定はやむを得ない。しかし1983年における暖房のガスへの依存度は業種間で0~24%とばらついている。

引用文献

1) 例えば、Kimura, F. and S. Takahashi: Atmospheric Environment, 25B, 155-164, 1991.

- 2) 神田学・立川貴一：日本気象学会1994年春季大会講演予稿集，65，130，1994.
- 3) Eaton, G.S.: *Monthly Weather Review*, 47, 801-, 1919.
- 4) Schmidt, W.: *Naturwiss.*, 5, 494-, 1917.
- 5) 例えば，一ノ瀬俊明・花木啓祐・松尾友矩：環境工学研究論文集，30，371-381，1993.
- 6) 岡建雄：日本建築学会論文報告集，276，87-93，1979.
- 7) 鶴野伊津志：「夜間の都市境界層の構造と大気拡散に関する研究」，230p，1988.
- 8) Narita, K. and T. Maekawa: *Energy and Buildings*, 15-16, 553-560, 1991.
- 9) Saitoh, T., T. Shimada and T. Hisada: *Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 5, 341-348, 1992.
- 10) 遠藤光緑：東北大学修士論文，1983.
- 11) 平松直人・花木啓祐・松尾友矩：環境システム研究，20，252-261，1992.
- 12) (財)日本エネルギー経済研究所/EDMC：「EDMC/エネルギー・経済統計要覧(1993年版)」，279p，1993.
- 13) 尾島俊雄・根津浩一郎：日本建築学会論文報告集，268，99-108，1978.
- 14) 関根清：「都市気候の形成要因に関する応用地理学的研究」，昭和54・55年度文部省試験研究(1)研究報告書，106-115，1981.
- 15) (財)日本エネルギー経済研究所：「新エネルギー導入可能性分析のための用途別エネルギー需要予測モデル」，1981.
- 16) 東京都都市計画局：「東京都土地利用現況調査事業要綱・要領」，1986.
- 17) 東京都都市計画局：「東京都市白書'94」，190p，1994.
- 18) 守田優・竹内友昭：環境システム研究，20，287-293，1992.
- 19) 東京都環境保全局：「地域暖冷房推進に関する指導要綱」，240p，1991.
- 20) 大阪ガス(株)：「建物負荷データ集」，354p，1991.
- 21) 久保幸夫：「環境データロギングシステムの開発」，平成3・4年度文部省試験研究B研究報告書，52p，1994.
- 22) 例えば，近藤純正：「身近な気象の科学」，東京大学出版会，189p，1988.
- 23) 守田優：環境システム研究，21，19-26，1993.
- 24) 三好伸浩・楠田哲也・井村秀文：環境システム研究，18，118-123，1990.
- 25) 辻明宏・新田義孝：電力中央研究所報告，T89041，46p，1990.
- 26) 藤野毅・浅枝隆・和気亜紀夫・藤野愛子：環境システム研究，21，1-6，1993.
- 27) Oke, T.R.: *Journal of Climatology*, 1, 237-254, 1981.
- 28) Lettau, H.: *Journal of Applied Meteorology*, 8, 828-832, 1969.
- 29) 空気調和・衛生工学会：「空気調和・衛生工学便覧」，1991.