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

ESTIMATION AND EVALUATION ON ENERGY FLOW IN OSAKA PREFECTURE

Material and energy metabolism in urban area and their relationships with buildings Part 2

下田 吉之*, 高原 洋介**, 亀谷 茂樹***, 鳴海 大典****, 水野 稔*****

Yoshiyuki SHIMODA, Yosuke TAKAHARA, Shigeki KAMETANI,

Daisuke NARUMI and Minoru MIZUNO

The energy flow which consists of inflow, conversion, consumption and discharge of energy is estimated for the region of Osaka Prefecture. To estimate energy flow in commercial and residential sector, we used not only the statistic but also our field survey results. We classified the phase of anthropogenic heat into sensible, latent and hot water discharge and examined the accuracy of the classification. The estimated energy flow is evaluated from the viewpoint of environmental impacts such as heat island, global warming and local/global atmospheric environment. Energy saving potential of heat cascading is also evaluated. In the final part of this paper, the impact of diffusion of DHC with cogeneration system in residential and commercial sector on total anthropogenic heat and emission is evaluated.

Keywords : Energy Flow, Heat island, Heat Cascading, Global Warming, Atmospheric Emission

エネルギーフロー, ヒートアイランド現象, ヒートカスケーディング, 地球温暖化, 大気排出物質

1. 緒言

前報¹⁾では、大阪府域を対象に物質資源の流入から転換、消費を経て廃棄に至る過程を記述した「マテリアルフロー図」を作成し、その中で建築関連フローの現状把握と将来予測をおこなった。本報では引き続き大阪府域を対象とした「エネルギーフロー図」を作成し、建築の都市エネルギーフローにおける位置づけを明らかにすることを試みる。

都市マテリアルフローにおいては、その流入・流出形態には財としての域外流出や年次を超えたストックの存在があり、非常に複雑である。その中で建築分野においてはストックの蓄積が将来の廃棄物量の増大を招く可能性が大きな問題として見いだされた。これに対してエネルギーフローについてみると、都市はほぼエネルギーの最終消費地であると考えることができ、エネルギーフローは熱量で見るとほぼ同量（電力転換による廃熱の発生等を除く）が流入・転換・消費・廃棄される比較的単純な形となる。従って上記のいずれかの段階においてその総量を把握することができれば、そのエンタルピーベースでのフローはマテリアルフローに対して比較的精度の良い推定が可能である。しかしながら、エネルギーの消費に伴う各種環境インパクトを正しく評価することや、カスケード利用等によるその改善可能性を論じるためには、エネルギーの種類や質等に関する分類がその各ステップ

においてなされる必要がある。

都市におけるエネルギーフローの効率性や環境影響を評価する上では、表1に示すような指標群が考えられる。

表1 エネルギーフローの評価指標

評価対象	評価のための具体的指標
地球温暖化防止	直接・間接の化石燃料消費に伴うCO ₂ 発生量
エネルギー資源の枯渇防止	直接・間接の化石燃料種類別消費量
大気汚染防止	直接・間接の化石燃料消費に伴う大気汚染物質排出量と排出場所
ヒートアイランド防止	域内エネルギー消費により発生する廃熱の質別・時間別排出量
カスケーディングによる省エネルギーの可能性	発生する廃熱の質別排出量と低温エネルギー需要量の関係

本論文では、大阪府域を対象として民生・産業・運輸の全分野にわたるエネルギーフロー図を基本的に積み上げベースで作成し、上記のような各種指標による評価を試みるとともに、特に民生部門での対策が評価指標に及ぼす影響を論じることを目的とする。

本論文に関連した既往の研究として、ヒートアイランド対策として

* 大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻 助教授・工博

** 大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻 大学院生

*** 東京水産大学水産学部海洋生産学科 助教授・工博

**** 大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻
助手・修士(生活科学)

***** 大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻 教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Environmental Engineering, Osaka University, Dr. Eng.
Graduate Student, Dept. of Environmental Engineering, Osaka University
Assoc. Prof., Dept. of Marine Science and Technology, Tokyo University of Fisheries, Dr. Eng.
Research Assoc., Dept. of Environmental Engineering, Osaka University, M. Liv.

Prof., Dept. of Environmental Engineering, Osaka University, Dr. Eng.

表2 建物用途別の調査概要と算出された年間原単位、冷熱熱源機器構成比、大阪府全体の床面積

建物用途	調査数(詳細調査数)	冷熱消費 (MJ/㎡年)	暖房消費 (MJ/㎡年)	給湯消費 (MJ/㎡年)	厨房エネルギー (MJ/㎡年)	その他電力 (kWh/㎡年)	冷熱熱源機器構成比(COP)			大阪府 全体の 床面積 (10 ⁶ ㎡)
							水冷冷凍機 (3.3)	空冷冷凍機・エアコン (2.8)	吸収式冷凍機 (1.2)	
戸建住宅	356(112)	11.3	95.2	157.5	35.7	94.1	0.000	1.000	0.000	158.2
集合住宅		13.3	58.4	219.3	51.6	119.9	0.000	1.000	0.000	80.3
商業	19(95)	363.7	93.6	175.6	—	1279.7	0.639	0.129	0.232	17.5
事務所	165(95)	185.9	60.3	85.7	—	430.9	0.366	0.306	0.328	37.7
遊興娯楽	6(2)	383.7	214.0	23.5	—	393.1	0.192	0.250	0.558	2.4
宿泊	27(7)	646.0	444.6	349.7	—	502.9	0.207	0.133	0.660	2.4
文教施設	50(2)	213.3	119.4	21.7	—	307.2	0.192	0.250	0.558	3.6
学校	99(5)	23.2	28.6	27.3	—	84.2	0.048	0.395	0.557	13.8
大病院	22(2)	347.7	323.4	199.8	—	501.8	0.245	0.288	0.467	3.8
医療厚生	4(2)	378.3	403.7	23.0	—	576.7	0.245	0.288	0.467	3.8
庁舎建築	29(2)	58.5	22.1	13.6	—	311.0	0.672	0.111	0.188	4.2

の廃熱量の把握が森山ら²⁾、垂水ら³⁾によりおこなわれている。また、地域エネルギー消費実態の把握として辻⁴⁾の研究がある。また著者らは既に同様のエネルギーフロー図を作成⁵⁾しているが、その際民生用エネルギー消費については熱負荷とエネルギー消費・空調機器構成を別々の資料をベースに推計していたものを、今回は著者らが別途実施した建物エネルギー消費実態調査の結果を基に統一する等の改良をおこなうとともに、各種環境影響評価を包括的にこない、更に民生部門での変化が全体に及ぼす影響についてのケーススタディを行っている点が本論文の特色である。

2. エネルギーフロー推定手法

エネルギーフローの推定は、民生、産業、運輸部門別に以下の手法によっておこなった。

2.1 民生部門

民生部門におけるエネルギーフローは、著者らが空調調和・衛生工学会近畿支部の活動として実施した関西地区建物エネルギー消費実

図1 民生部門エネルギーフロー推定フロー

態調査⁶⁾の結果をもとに推定した。推定フローを図1に示す。同調査においては、関西地区の各種建物(総計 777 件)を対象に、一次調査として建物特性、熱源機器および月別エネルギー消費量についてアンケート調査をおこなった上、234 件の建物については二次調査として月別時刻別エネルギー消費量やその用途別内訳等を集計しているが、本研究ではここから建物用途別に月別・時別の熱・電力消費原単位と熱源機器の利用比率を推定し、大阪府全体の建物用途別床面積(1993 年)を乗じて地域全体のエネルギー消費量を推定している。更に各熱源機器についてはその成績係数を仮定し、エネルギー消費量から熱消費量を推定した。更に、熱負荷計算プログラム HASP/ACLD を使用して日本建築設備士協会によるモデル事務所ビル⁷⁾の熱負荷構成を計算し、冷凍機から排出される廃熱中、内部のエネルギー消費によるものと、建物外からの貫流・換気によるものの比率を月別に推定した。給湯廃熱については著者らが別におこなった実測結果⁸⁾より下水(水系)排出率を設定した。なお空調機器からの廃熱量に関しては熱源構成比率推定手法別の結果の差について 2.4 (1) で検討している。以上のうち主な設定値を表2に示す。

これらの原単位を用いた推定の妥当性を検討するため、上記の手順で得られた家庭用およびその他業務用の電力・ガス消費量を、大阪府統計年鑑⁹⁾より得られた 1997 年度の電灯(家庭用電力消費と見なす)電力、業務用(家庭用以外の民生用とみなす)電力、家庭用都市ガス、業務用(商業用+医療用の合計)都市ガスの消費量と比較したところ、表3のようになった。エネルギー消費量は気象状況等により毎年変化するものであり、また使用した床面積データの年次がエネルギー消費量統計と異なっているが、これらの要因を考慮しても家庭用電力消費量についてはその差が大きい。これは家庭用エネルギー消費について世帯あたりのデータを面積あたり原単位に変換したことによる誤差やサンプルの代表性の問題等が考えられ、ここでは統計値が正しいものとしてこの差を各用途の比率が一定となるように家庭用電力消費の推定値に加えた。

現状のコジェネレーションによる発電量および熱利用量に関しては、大阪府下の民生用コジェネレーション発電容量(120MW)¹⁰⁾をもとに、年間稼働時間 3500 時間、発電効率 30%、廃熱回収率 40%として発電量と熱利用量を推定した。

なお、現状の太陽光利用、太陽熱利用についてはその他のエネルギー源に対して量的に小さいと考えられることから無視している。

表3 民生用電力・都市ガス消費量の統計値と推定値の比較

	本研究による推計値 (TJ/年)	1997年度統計値 (TJ/年)	差
業務用電力	49717	56604	14%
業務用都市ガス	25307	28190	11%
家庭用電力	32361	63294	96%
家庭用都市ガス	55390	55871	1%

図2 大阪府民生部門年間エネルギーフロー [TJ/年]

図2に、民生部門の年間エネルギーフロー推定結果を示す。

2.2 産業部門

産業部門に関しては、大阪府下で大気汚染防止法対象のばい煙発生施設（大規模施設）を持つ工場・事業所の燃料使用量データ(1997年度、計15,375件)を使用し、これに燃料別の高発熱量を乗じて熱量単位に統一しエネルギー消費量を求めた後、施設別にエネルギーフローを想定した上で表4のように設定した廃熱発生係数より、廃熱の形態別発生量を次式により求めた。

$$Q_S = Q_T(1 - r_f - r_l - r_w - r_u) \quad (1)$$

$$Q_L = Q_T(r_f + r_l) \quad (2)$$

$$Q_W = Q_T \cdot r_w \quad (3)$$

ここで Q_T, Q_S, Q_L, Q_W : 総エネルギー消費量、顕熱・潜熱・水系

廃熱量[TJ]、 r_f : 燃料発熱の潜熱分、 r_l, r_w, r_u : 施設からの潜熱、

水系廃熱発生率と有効利用率である。また上記データに含まれないいわゆる群小発生施設でのエネルギー消費については、大気汚染対策資料として市町村単位で燃焼施設別に推計された燃料使用量から排熱の形態別発生量を算出した。さらにこれらの統計では把握できない電力使用量は、大阪府全体での電力消費量中電灯・業務用電力、後述の電車の消費電力を除いたものとし、これは全量顕熱にて廃棄されると仮定した。

次に、大規模施設からのカスケードリングによる熱利用の可能性を検討するため、大規模施設のエネルギー消費量に、施設別・エネルギー

一回収の有無別に表4のように設定した温度別・形態別の廃熱発生原単位を乗じてエネルギー回収量を想定した。なお、ここで原油換算1000kl/年（高発熱量38,720MJ/年）以上の工場では熱量の50%、それ以下の工場では熱量の20%が既にエネルギー回収されている（表中の「回収有」と仮定した。

なお、産業部門に設置されているコージェネレーションシステムからの発電・熱利用に関しては、発電容量(225MW)^{注1)}をもとに、年間稼働時間6000時間、発電効率25%、廃熱回収率50%として発電量と熱利用量を推定した。また、一般廃棄物の焼却発電に関しては、発電容量(99MW)をもとに、年間稼働率64.3%^{注1)}として発電量を推定した。図3に産業部門におけるエネルギーフローを示す。

表4 利用可能廃熱・人工廃熱発生原単位[%]

燃焼施設	廃熱発生施設	人工廃熱発生率			廃熱種*	利用可能廃熱発生率	
		r_l	r_w	r_u		回収有	回収無
ボイラー	本体	0	0	0	2	0	20
					3	10	0
発電用ボイラ	本体・タービン	0	50	40	3	—	10
焙焼炉・焼結炉	本体	0	0	0	3	—	20
溶鉱炉・転炉	本体・冷却装置	15	10	0	1	10	30
金属溶解炉	本体	0	0	0	1	0	50
	廃熱ボイラ				3	10	0
金属加熱炉	本体	35	0	0	1	20	30
石油加熱炉	本体・廃熱ボイラ	0	0	0	1	0	40
					3	10	0
触媒再生炉	本体・廃熱ボイラ	0	0	0	3	20	50
窯業用焼成炉	本体	0	0	0	1	0	60
					3	10	0
反応炉・直火炉	本体	15	0	0	2	—	20
乾燥炉	本体	50	0	0	2	0	30
					3	10	0
電気炉	本体・冷却装置	15	10	0	1	10	20
					2	10	10
廃棄物焼却炉	本体・廃熱ボイラ・タービン・複水器・空気余熱器	0	10	10	1	0	90
					3	80	0
ガスタービン	本体・廃熱回収器	0	0	0	3	20	—
ディーゼルエンジン	本体・廃熱回収器	0	0	0	3	30	—
ガスエンジン	本体・廃熱回収器	0	0	0	3	20	—
その他	本体	0	0	0	3	—	50

注: 廃熱種は 1:300℃以上 2:200℃以上 3:100℃以上(全て気体)

表中、「—」は機器全てが廃熱回収有あるいは廃熱回収無を示す。

図3 大阪府産業部門年間エネルギーフロー [TJ/年]

2.3 運輸部門

運輸部門のエネルギーフローに関しては大阪府域で消費されたエネルギーの特定が困難な船舶、航空機によるものは除外し、自動車、鉄道について推計をおこなった。自動車に関しては交通量および車種別燃料消費率を用いて推定された 1997 年度の燃料消費量^{注 2)}を使用し、鉄道については同様に推定された電力消費量を使用した。人工廃熱としては、自動車燃料中の潜熱分のみ潜熱として、後は顕熱として計上した。

図 4 に運輸部門におけるエネルギーフローを示す。

図 4 大阪府運輸部門年間エネルギーフロー [TJ/年]

2.4 データの検証

(1) 空調機器比率の推定手法の相違による廃熱量の差

民生部門における人工廃熱の推定においては関西地区建物エネルギー消費実態調査を基に廃熱特性別の熱源機器の構成比率を推定したが、この調査ではデータの取得容易性の点から対象サンプルが大型建物に偏る傾向があったため、ビルマルチ型エアコン等の個別機器の内訳が実際より少なく推計されている可能性がある。これは特に人工廃熱の評価において潜・顕熱比の推定に大きな影響を及ぼすものと考えられる。そこで、日本冷凍空調工業会資料¹⁰⁾に記載されている 1988 年から 1997 年までの冷房機器販売容量の累計から算出した冷熱源機器の比率（水冷 5.8%，空冷 78.3%，吸収式 15.8%，「販売比率」）を用いて月別・時刻別に冷房からの廃熱量を算出し、上記実態調査による機器比率（「調査比率」）を用いて算出した廃熱量と比較した。販売比率で廃熱量を算出する際、①全建物用途に販売比率を適用して計算する方法と、②住宅はすべて空冷ヒートポンプエアコンとし、また機器比率に顕著な特徴のある総合病院と宿泊施設については実態調査による機器比率を用い、その他を販売比率とする方法（「補正比率」）の 2 通りでそれぞれ廃熱量を計算している。顕熱廃熱についての結果を図 5 に示す。廃熱の総量はほとんど変化していないが、全体に占める顕熱の割合は補正比率の場合 68% となり、調査比率を用いたときの 48% にくらべて約 1.4 倍増加する。

(2) 産業部門の潜・顕熱設定比率、利用可能廃熱設定比率の検証

産業部門の人工廃熱量および有効利用可能廃熱発生原単位の設定値の妥当性を確認するため、煙突からの年間乾き排気ガス量、平均水分量、排気ガス温度が得られた A 市の全施設(1,076 件)について、

図 5 民生部門の冷房顕熱の月変化

(a) 煙突での測定値による (b) 廃熱発生原単位による

図 6 利用可能廃熱の計算結果の検証

図 7 廃熱の潜顕熱比の計算結果の検証

空気密度・比熱を標準状態、外気温度 16℃ として計算した利用可能廃熱量、大気への顕熱廃熱量、潜熱廃熱量を計算し、上記の燃料消費量に対する原単位より計算した値と比較した。

利用可能廃熱量について、煙突における測定値からの推定値とエネルギー消費量から原単位を用いて推定した値の比較を図6に示す。温度レベルについて煙突における測定値が全体的に低くなっているが、これは煙突で排出される場合にはエコマイザーによる熱回収や途中での熱損失があることが原因の一つと考えられ、量的には両者は特に総量の大きな施設において良く一致している。

また、廃熱中の潜熱の割合について図7に示す。金属加熱炉、乾燥炉において煙突での測定値が低くなっているが、これは煙突以外からの潜熱発生があることによるもので、本研究の設定値はおおむね妥当であるといえる。

(3) 全消費エネルギー量の統計値との比較

上記3部門の推計によって得られた大阪府全体におけるエネルギー消費量を、統計資料より得られた1995年の大阪府におけるエネルギー販売量データと比較し、表5に示す。産業用電力および家庭用電力では推計の一部に統計値自体を使用しているため自明であるが、その他の電力、都市ガスについても両者は良く一致している。石油類について統計値の方が大きくなっているのは、統計では府内で販売された量を計上しており、府外で燃焼しているものや工業原料として使用されたものを含むことに基づく。

表5 推計された燃料別エネルギー消費量と統計値との比較

燃料	単位	産業	交通	民生	データ合計	大阪府統計	データ/統計	府統計備考
重油	1000 k l	755	0	96	852	1994	0.427	製品販売量
軽油	1000 k l	16	1373	0	1389	2308	0.602	製品販売量
灯油	1000 k l	397	0	350	747	946	0.790	製品販売量
ナフサ	1000 k l	0.09	0	0	0	757	0.00012	製品販売量
ガソリン	1000 k l	0	1766	0	1766	2946	0.599	製品販売量
燃料油総量	1000 k l	1169	3139	446	4754	9367	0.508	製品販売量
都市ガス(産業用)	1000m3	1609106	0	0	1609106	1763645	0.912	工業用
都市ガス(家庭用)	1000m3	0	0	1202921	1202921	1213377	0.991	家庭用
都市ガス(業務用)	1000m3	0	0	549605	549605	612220	0.898	商業+医療
LPG(工業用)	1000ton	192	0	0	192	153	1.257	販売実績
電力(産業用)	GW h	23340	2270	0	25610	25610	1.000	電力需要(大口+小口)
電力(家庭用)	GW h	0	0	17582	17582	17582	1.000	電灯需要
電力(業務用)	GW h	0	0	13810	13810	15723	0.878	電力需要(その他)
総計(二次エネルギー)	TJ	221485	123144	210574	555204	717629	0.774

図8 大阪府全体での年間エネルギーフロー

3. エネルギーフローの現状評価

3.1 エネルギーフロー全体の評価

図8に大阪府におけるエネルギーフローの推定結果を示す。大阪府外から大阪府に流入するエネルギー量（熱量ベース）の総計は796,324TJ/年、廃熱として廃棄されるエネルギー量は839,248TJ/年となる（両者の差異は、冷房廃熱量に貫流熱など冷房負荷分を含めていること等により生じる）。大阪府統計年鑑⁹⁾より府域の面積と月別平均日射量から年間太陽日射量を推計すると、大阪府域における太陽放射の年間エネルギー量は8,754,213TJ/年で、上述の流入エネルギー、廃熱量はそれぞれ太陽日射量の8.5%、9.6%に相当する。また、人口一人当たりのエネルギー消費は98.8GJ/人年（発電、廃棄物含む）で、日本の最終エネルギー消費量の平均121.7GJ/人年（1997年）¹⁰⁾より小さい。また、民生部門のみで見ても、24.6GJ/人年は日本の平均31.6GJ/人より小さい。

最終需要（649,335TJ/年）の内訳を部門別に見ると、産業47.7%、民生33.4%、運輸19.0%となり、1998年の全国エネルギーバランス表¹¹⁾の比率（各46.3%、26.4%、25.2%）と比較して民生部門が大きく、運輸部門が小さくなっており、高密度居住で三次産業の割合の大きい大都市の特徴が表れている。また、燃料別に見ると、電力が23.9%、都市ガスが39.3%を占め、全国（各22.0%、6.0%）にくらべて大きいことが特筆される。特に民生部門のみでは、両者の合計が91.0%を占める。また、廃棄物からのエネルギー発生量が全体の流入エネルギー量の6.1%に相当する程大きい点にも将来の利用ポテンシャルとして注目すべきである。

3.2 人工廃熱としての評価

人工廃熱としては、顕熱として72%、潜熱として14%、水系に14%が排出され、顕熱が大部分を占める。うち、建築からの廃熱（民生部門）は、顕熱の30%、潜熱の37%を占める。ただし、都市大気への影響を考えると、都心部に集中し排出高度の低い建築からの廃熱の影響の割合はより大きくなると考えられる。

また先に述べた推計手法の異なる冷房熱源機器構成を用いて民生部門の廃熱を推計した場合の大阪府全体の廃熱量に対する影響は、販売比率を用いた時には図8に比べ顕熱が4%増加し、潜熱が21%減少、補正比率を用いると顕熱が3%増加し、潜熱が15%減少する。ただし廃熱量の合計はほとんど変化しない。

3.3 利用可能廃熱量の推計と省エネルギーポテンシャル

廃棄物処理および電力転換部門を含めた産業部門全体について、2.2で示した手法により推計した温度別廃熱量を、表6に示す転換効率を仮定し、利用した場合の利用可能エネルギー量を表7に示す。なお、ここで熱利用による省エネルギー量の計算は、搬送動力を考慮せず、比較システムを温熱年間COP=3.6、冷熱年間COP=2.8の空気熱源ヒートポンプとして計算している。

得られる電力量は大阪府全体の電力消費量の3%に相当する。廃熱源としては廃棄物処理場が全体の52%と最も大きく、石油加熱炉、溶鉱炉・転炉、金属加熱炉などもそれぞれ10%程度を占めている。また、冷熱、温熱は、2.1で推計した熱需要量のそれぞれ42%、39%が得られ、全て活用すれば44,595TJ/年の一次省エネルギー効果となる。ただし、この実現のためには熱の広域搬送が必要となり、廃熱源

と熱需要地（密集市街地）の現状の配置を考えれば大規模な活用は現実的でない。

3.4 大阪府のエネルギー消費に伴うCO₂、NO_x、SO_x排出量の推計

大阪府域のエネルギー消費に伴う地球温暖化影響（ここではCO₂に限定して考える）と大気汚染影響を評価するため、ここで示したエネルギーフローによって生じるCO₂、NO_x、SO_xの域内、域外における排出量の推計をおこなう。域内エネルギー消費に伴う直接排出に関しては、NO_x、SO_xは大阪府での年間排出量の統計値¹²⁾を、CO₂については環境庁¹³⁾の燃焼による排出原単位に大阪府の燃料消費データを乗じて算出した排出量を用いる。域外排出に関しては、大阪府域内で発電された電力はすべて大阪府域内で消費されるとし、差し引いた

表6 利用可能廃熱の利用法と転換効率

廃熱の種類	利用方法	変換効率
気体 300℃以上	蒸気タービン発電に使用し、更にその廃熱のうち高温排水を単効用吸収式冷凍機（COP0.7）に使用	発電 15% 温冷熱 40%
気体 200～300℃	温熱利用または二重効用吸収式冷凍機（COP1.2）に使用	温熱 80% 冷熱 96%
気体 100～200℃	温熱利用または単効用吸収式冷凍機（COP0.7）に使用	温熱 80% 冷熱 56%

表7 利用可能廃熱量とその省エネルギー量

単位 (TJ/年)		空調熱源・発電用として利用			
		気体 300℃ 以上	気体200 ～300℃	気体100 ～200℃	合計
産業部門からの利用可能廃熱量		40841	10652	45876	97369
利用可能量	電力	6126	0	0	6126
	温熱	8168	4261	18351	30780
	冷熱	5718	5070	12845	23634
一次換算省エネ ルギー量	電力	16079	0	0	16079
	温熱	5955	3107	13379	22441
	冷熱	5360	4753	12041	22154
	合計	27394	7860	25420	60673

図9 大気環境負荷物質の排出量

残りの消費電力に関しては関西電力(株)の発電所の1997年の発電実態¹⁰⁾から燃料構成を推定し、燃料別に各排出物の発生原単位を乗じた。また、石炭・原油・LNGの海外排出分については本藤ら¹⁵⁾による影響物質排出量原単位を併用した。都市ガスに関しては原料比から同様の手法で域外排出を算出している。図9に計算結果を示す。

CO₂については、府外の発電所における府内電力供給にともなう排出の割合が7.9%とかなり大きい。また、大気汚染質では海洋での排出量が大きく、SO_xにおいては大阪府内よりも府外での排出量が大きくなっている。

4. 民生用エネルギーシステム変更によるフローへの影響評価

上で見てきた大阪府域全体のエネルギーフローについて、民生用エネルギーシステムの変更に伴うエネルギーフローへの影響を見る一例として、コージェネレーション地域熱供給が大規模に導入された場合についてのケーススタディをおこなう。

2.1 で推計した熱需要を0.5km四方のメッシュに分類し、内4.2TJ/ha年(1Tcal/ha年)の熱需要密度のある地区(全7,386メッシュ中87メッシュ、熱需要、電力需要は民生部門全体の各16.1%, 18.4%)に図10に示すようなガスタービンCGSが配置された場合について検討する。ここでは、運転形態として表8に示す3通りを考える。

(CGSにより発電した電力は従来の火力発電による発電量を減少させるものとして計算する)結果を図11に示す。CGSの導入により、対象地区内の一次換算エネルギー消費量(系統電力の1kWh=10.26MJとして換算)は10~15%減少するが、発電を域内でおこなうことにより、利用できなかった廃熱は域内の廃熱量を増加させることになる。Case1の場合の顕・潜熱廃熱の増加量15,169TJ/年、14,607TJ/年はそれぞれ大阪府からの全廃熱量の2.5%, 12.4%に相当する。

また、各ケースにおけるCO₂、NO_x、SO_xの域外排出を含む民生部門総排出量を図12に示す。CGS(Case1)導入によりCO₂で0.3%(大阪府全体の0.08%)、NO_xで12.0%(同1.4%)、SO_xで37.9%(同8.4%)の減少となる。

5. 結論

本論文では大阪府域を対象として民生・運輸・産業の各部門別に、エネルギーフローを可能な限り積み上げベースで推計し、その全体像の把握および表1に示したような各視点からの評価をおこなった。得られた知見をまとめれば以下ようになる。

- 大阪府全体では年間ベースで太陽日射量の10%にも相当するエネルギーのフローが存在する。これは特に都市気候への影響を考えると無視できない大きさである。また、都心部においてはこの比率は更に高まる。
- 環境負荷の観点からは、今回大阪府内でのエネルギー消費に起因する域内、域外での環境負荷排出分布を明らかにした。なお建物エネルギーシステムの選択は総量のみでなく、発電所や建物の場所など排出場所の分布自体にも影響を及ぼすので、特に排出場所が環境へのインパクトに大きく関係する大気汚染物質においては重要な視点であると考えられる。
- ヒートアイランド防止の観点から見ると、建築は顕熱廃熱の約3割、潜熱廃熱の4割を占め、かつ、居住地付近で発生する

図10 ガスタービンCGSの概要

表8 ガスタービンCGSの運転パターン

	運転方式	概要
Case1	電力負荷追従運転	理想的な電主熱従運転で、対象地区の電力需要全てを供給する
Case2	熱負荷追従運転	理想的な熱主電従運転を仮定し、対象地区の熱需要全てを供給する
Case3	余剰無運転	余剰熱・余剰電力が常に発生しないよう運転する

図11 対象地区のCGS導入の影響(年間)

図12 CO₂、NO_x、SO_x 民生部門総排出量への影響

こと、廃熱の形態をシステム選択によって変更できることなどから人工廃熱抑制策として重要である。ただし、その実態把握については推計手法により大きな差が生じており、今後検討の必要があろう。なお実際の廃熱排出状況とヒートアイランド現象の関係の検討には廃熱発生空間的分布と拡散を考慮することが必要である。

廃棄物処理場の廃熱を含めた産業部門から発電や民生部門へのヒートカスケディングによる省エネルギーポテンシャルは、二次エネルギーベースで大阪府に流入するエネルギーの約6%を削減できるほど大きい。特に廃棄物処理場から発生する廃熱が大きな割合を占めている。ただし、熱利用については廃熱源と熱需要施設である建築との空間的・時間的関係が重要で

あり、土地利用が廃熱有効活用の大きな鍵となると考えられる。

- ・ 本研究では、できるだけ個々の技術（建物の省エネルギーや熱源機器選択）の影響を正確に表現することを目的として、積み上げ型のフロー推定をおこなったが、家庭用の電力消費（原単位からの推計結果との乖離が大きい）と産業用の電力消費（積み上げのためのデータが存在しない）については統計値をそのまま使用した形となっている。今後はこれらの原単位化を含め、より詳細なレベルでの積み上げを行うことが一つの課題である。
- ・ また、評価の視点や考慮する対策によって、エネルギーフローを表現する時空間スケールは異なる。例えば季節別時刻別の整理、メッシュデータとしての表現が目的によって必要である。今回はデータの取得容易性から空間では大阪府を基本単位としたが、目的に応じた空間スケールの適正サイズについての考察も今後必要であろう。

謝辞

本研究の遂行に当たり、関係行政機関より多大な協力をいただいた。記して謝意を表する。

注1)近畿通商産業局「近畿エネルギー白書」(1999)における1997年度の値（ただし廃棄物焼却発電の稼働率については近畿地方の平均値）を使用。

注2)大阪府環境農林水産部資料による。

参考文献

- 1)下田吉之, 井上晋一, 山岸源, 水野稔: 大阪府におけるマテリアルフローの推定と評価, 日本建築学会計画系論文報告集, No.546, pp.83-90, 2001.8
- 2)森山正和: 地域環境アセスメントにおける地表面熱収支理論の応用研究 第4報, 日本建築学会論文報告集, No.273, pp.69-77, 1978.11
- 3)H. Tarumi, S. Fujii and N. Ito: Conversion of Exhaust Heat to Latent Heat for the Management of the Thermal Environment in Urban Areas, Energy and Buildings, No.15-16, pp.609-616, 1990/91
- 4)辻穀一郎: 都市のエネルギー需要と供給システム, エネルギー・資源, Vol.14 No.2, pp.146-152, 1993.3
- 5) Y. Shimoda, M. Mizuno, S. Kametani and T. Kanaji: Evaluation of low-level thermal energy flow in the Osaka prefectural area, International Journal of Global Energy Issues, Vol.11 No.1-4, pp.178-187, 1998

- 6)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, 空気調和・衛生工学会近畿支部, 1997.3
- 7)日本建築設備士協会空気調和設備シミュレーション研究会: 国内の空調装置シミュレーションプログラムの比較, 空気調和・衛生工学, 58-7, pp.65-78, 1984.7
- 8)水野稔, 中村安弘, 下田吉之, 内田睦, 亀谷茂樹: ある地域給湯住宅団地の排水特性の実測とその保有エネルギーの評価に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, 50, pp.73-84, 1992.10
- 9)大阪府: 大阪府統計年鑑, 大阪府統計協会, 1998
- 10)日本冷凍空調工業会: 冷凍空調機器データブック, 1998
- 11)日本エネルギー経済研究所: エネルギー・経済統計要覧, 省エネルギーセンター, 2000
- 12)大阪府環境保健部: 大阪府環境白書, 大阪府環境保健部, 1998
- 13)環境庁: 地球温暖化対策地域推進計画策定ガイドライン, 1993
- 14)通商産業省資源エネルギー庁公益事業部編: 電力需要の概要, 1998
- 15)本藤祐樹, 内山洋司, 外岡豊: 化石燃料の国内消費に伴い海外で誘発される環境影響物質 CO₂, NO_x, SO_x 排出量, エネルギー・資源, No.20 Vol.6, 1999.11

本論文に関連する既発表論文

- 1)高原洋介, 下田吉之, 亀谷茂樹, 水野稔: 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) ~大阪府における都市エネルギーフローの改良~, 日本建築学会近畿支部研究報告集第40号・環境系, (2000-6), pp.289-292
- 2)下田吉之, 井上晋一, 高原洋介, 水野稔: 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1) ~基本概念と大阪府物質フロー, エネルギーフローの推定手法~, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, (2000-9), pp.723-724
- 3)高原洋介, 下田吉之, 水野稔, 亀谷茂樹: 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3) ~大阪府における都市エネルギーフローの改良~, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, (2000-9), pp.727-728
- 4)高原洋介, 下田吉之, 水野稔: 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4) ~大気汚染物質の地域別排出量・空調システム代替の環境影響評価~, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, (2001-9), pp.655-656
- 5)Yoshiyuki Shimoda and Minoru Mizuno: Material and Energy Metabolism in Urban Area, Proceedings of the International Conference Sustainable Building, pp.319-321 (2000)

(2001年11月10日原稿受理, 2002年1月16日採用決定)