密集市街地におけるエネルギー消費および温熱環境の実態調査と 外部温熱環境の解析

A SURVEY ON ENERGY CONSUMPTION AND THERMAL ENVIRONMENT AND ANALYSIS OF THERMAL ENVIRONMENT IN A DENSELY POPULATED URBAN AREA

西村秀彦*, 辻 政宏*, 銚井修一**, 西岡利晃***
Hidehiko NISHIMURA, Masahiro TSUJI, Shuichi HOKOI
and Toshiaki NISHIOKA

Energy consumption and thermal environment in residential houses in a densely populated area of Osaka were investigated in order to solve energy and environmental problems. The results showed that the energy consumed for cooling is three to four times higher than in the other areas of Japan and that the indoor temperature in the investigated area could rise over 30°C in summer without a room air-conditioner. Along with this study, we analyzed the thermal environment in an alley during summer. It was found the incident solar radiation, the heat discharged from air-conditioners, and the air exchange rate between the alley and the upper air space have a great influence on the thermal environment in the alley.

Keywords : Densely populated urban area, Energy consumption, Thermal environment, Survey, Alley space

密集市街地, エネルギー消費, 温熱環境, 実態調査, 路地空間

1.はじめに

近年、エネルギー資源の枯渇、ヒートアイランド現象などの地球環境問題が深刻になっている。これは、様々な分野において大量のエネルギーが消費されるようになった結果であるが、特に、生活水準の向上に伴い、民生用エネルギーの消費は着実に増加の一途をたどっている¹⁾。

このような状況に対する打開策として、未利用エネルギーの有効活用や地域冷暖房等の地域熱供給の研究^{2)~5)}などが進められてきた。また、そのための基礎資料として施設を用途ごとに分類し、各施設のエネルギー使用量などに関するデータベースが整備されてきた^{2), 6)}。さらに、一般生活に関わりの深い住宅のエネルギー消費に焦点を絞った調査も行われている^{7)~12)}。

上述の研究2)、6)~12)では、仕事場と住宅が兼用になった複合用途の住宅が密集した市街地は対象とされていないが、この種の既存住宅地は多くの都市に見られ、今後の都市の再開発においても有効に利用すべきストックとして保存・再生が望まれるものである。したがって、このような地域のエネルギー消費や温熱環境の実態を把握することは、種々の将来予測や都市の在り方を検討する際に重要になってくると考えられる。

以上の観点より、本研究では、①大阪市西成区の密集市街地においてエネルギー消費及び温熱環境の調査を行い、現状を把握し、

②この調査を通して明らかにされた問題のうち、特に夏期の路地空間の温熱環境をとりあげ、①の調査結果を用いて対象地域に関する温熱環境の解析を行い、空調排熱が及ぼす影響を推定するとともに、改善策について検討することを目的とする。

2.エネルギー消費の実態調査

2-1.調査項目と調査方法

調査対象は、大阪市内の密集市街地にある住宅である。対象地域と西成区、大阪市の人口密度と世帯密度¹³⁾を表1に示す。人口密度、世帯密度とも大阪市の2倍弱となっている。

対象地域にある70戸の住戸の承諾を得て、1996年12月~1998年2月(ガスは1月)の電力・ガス消費量データを、関西電力・大阪ガスから入手した。

また、1998年1月と1999年8月に、住戸の特性を把握するためのアンケート調査を行った。

1998年1月の調査内容は、住宅の構造、種別(戸建て住宅・集合住宅)、築年、延べ床面積、居住者人数、住戸平面図、空調機器・給湯機器・厨房機器・家電機器の保有台数、使用頻度、1日あたりの使用回数、1回あたりの使用時間などであり、13戸から回答を得た。

1999年8月の調査では、住宅の用途・構造・階数・室数・延べ床面積、居住者数、クーラー保有台数、風呂の有無、年間灯油消

本論文は第1回近畿環境工学シンポジウム(主催:日本建築学会近畿支部・環境工学部会, 1999.10.28)での発表に加筆・修正したものである。

* 京都大学大学院工学研究科修士課程

** 京都大学大学院工学研究科 教授・工博

*** 大阪市立大学工学部 教授・工博

Graduate Student, Graduate School of Engineering, Kyoto University
Prof., Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr. Eng.
Prof., Faculty of Engineering, Osaka City University, Dr. Eng.

費量などを調べ、38戸から回答を得た。

表1 人口・世帯密度比較

	調査対象地区 (約25ha)	西成区 ⁽¹⁾ (735ha)	大阪市 ⁽¹⁾ (22,127ha)
人口密度 [人/ha]	216	191	118
世帯密度 [世帯/ha]	89	102	50

2.2. エネルギー消費実態調査結果

1997年1～12月の月別の電力・ガス消費量データと1999年8月のアンケート調査での年間灯油消費量に関する回答から、対象地域におけるエネルギーの年間消費量、月別消費量（電力・ガス）、用途別（冷暖房用）消費量について検討する。

なお、年間エネルギー消費量と冷暖房用エネルギー消費量の検討の際、対象地域との比較に用いる大阪市の住宅平均⁽¹⁰⁾（以下大阪市と呼ぶ）、全国の住宅平均^{(11)、(12)}（以下全国）、東京都の住宅平均^{(11)、(12)}（以下東京都）のデータには、表2に示すように調査年度に違いがある。また、本論文では2次エネルギー換算で評価する。各エネルギーの換算に用いた値⁽²⁾を表3に示す。

2回のアンケート調査から得られた38戸の平均延べ床面積と平均居住人数を、居住専用住宅（以下専用住宅）24戸、仕事場併用住宅（以下併用住宅）14戸、全体38戸について表4に示す。

(1) 年間エネルギー消費量

1997年の調査対象地域における年間消費量平均と大阪市⁽¹⁰⁾、全国⁽¹¹⁾、東京都⁽¹¹⁾との比較を図1に示す。専用住宅24戸、併用住宅14戸についても、各々平均をとって示した。

調査年度に違いがあるため年間エネルギー消費量伸び率（2～3%）⁽¹⁾を考慮すると、対象地域の専用住宅の電力消費量は、大阪市や東京都とほぼ同程度、全国よりやや多い程度となる。ガスに関しては、大阪市と全国のほぼ中間となっている。大阪市に比べて消費量が少ないのは、対象地域では風呂を備えていない住宅が多い（専用住宅の1/3⁽³⁾）ためと考えられる。灯油に関して見ると、全国よりかなり少なく、大阪市と東京都の間にある。ただし、灯油は電力やガスのようにどの住宅でも使用している訳ではなく、ある程度の消費がある住宅と全く使用しない住宅とに分かれている。サンプル数が少ない本調査では、注意が必要である。エネルギー3種類の合計で見ると、全国、東京、大阪市と比較して1～2割程度少ない（年間エネルギー消費伸び率考慮）ことがわかる。

専用住宅と併用住宅の違いをみると、電力、ガス、灯油のいずれについても併用住宅は専用住宅の約2倍の消費量となっている。

図1 年間エネルギー消費量

対象地域の調査戸数： 全住戸…70戸（灯油は26戸）
専用住宅…24戸（灯油は17戸）
併用住宅…14戸（灯油は9戸）

表2 対象地域と他地域のデータの調査年度の違い

調査年度	対象地域	大阪市 ⁽¹⁰⁾ 1990～1995年の平均	東京都 ^{(11)、(12)} 1992年	全国 ^{(11)、(12)} 1992年
------	------	--------------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------

表3 エネルギー換算表⁽²⁾

種類	換算値 [kJ](kcal)	
	1次	2次
電力 [kWh]	9,419 (2,250)	3,600 (860)
都市ガス(13A) [m³]	46,046 (11,000)	同左
灯油 [L]	37,255 (8,900)	同左

表4 エネルギー調査対象住戸の延べ床面積と居住人数

	専用住宅 (24戸)	併用住宅 (14戸)	全体 (38戸)
延べ床面積 [㎡/世帯]	65.8	92.2	75.5
居住人数 [人/世帯]	2.96	3.07	3.00

(2) 月別エネルギー消費量

対象地域における電力、ガスの月別消費量を、専用住宅（24戸）・併用住宅（14戸）・全住戸（70戸）に分けて図2、3に示す。

月別電力消費量ではいずれの場合においても、8月と1月に季節のピークが明瞭にみられる。専用住宅と併用住宅を比較すると、両者の比率はもっとも大きい10月で約2.03倍、小さい2月で約1.43倍となっているが、年間変動パターンは類似している。

月別平均ガス消費量では、いずれの住戸においても冬期のみ季節のピークが現れ、冬を最高、夏を最低にほぼ一定の割合で変化している。1998年のアンケート調査では、ガスを暖房に使用していたのは1戸のみであったことも考慮すると、冷暖房に用いられているガスの割合は低く、ガス消費量の変動に影響を与えているのは給湯であると推定される。専用住宅と併用住宅の比率を比較すると、もっとも違いの大きい6月で約2.20倍、小さい2月で約1.98倍であり、年間変動の形態は似ている。

図2 月別電力消費量（1997年）

図3 月別ガス消費量（1997年）

(3) 冷暖房用エネルギー消費量（推定）

冷暖房用エネルギーの推定を行う。冷房用エネルギーとしては、電力のみが使用されていると考え、差引法^{(2)、(6)～(9)、(12)}を用いて推定した。暖房には電力と灯油が使用されていると考え、差引法を用いて推定した暖房用電力消費量とアンケート調査より得た灯油消費量の合計を暖房用エネルギーとしている。ガスについては、1998年に行ったアンケート調査で暖房に使用していると回答し

た住戸が極めて少なかったことと、前述の月別消費量の変動から、対象地域においては冷暖房用エネルギーとしてほとんど使用されていないと考えられるので、ここでは除いて処理している。対象地域の住宅と大阪市¹⁰⁾、全国¹²⁾、東京都¹²⁾を比較した結果を図4に示す。

冷房用エネルギー消費量について、大阪市、全国、東京都の結果を見ると、大阪市は全国や東京都に比べて約3倍の消費量になっている。対象地域の専用住宅は大阪市よりもさらに消費量が多く、全国の3.6倍、東京都の3.1倍である。併用住宅では専用住宅の約1.5倍となっている。対象地域での冷房用エネルギー消費が、他地域に比べて非常に多いことがわかる。

暖房用エネルギー消費量について見ると、冷房用エネルギーとは逆に、大阪市は全国や東京都の約2/3の消費量になっている。対象地域の専用住宅は大阪市の約2/3、全国や東京都の半分程度である。併用住宅は専用住宅の約1.6倍であり冷房用と同程度の比率となっている。ガスを除いていることを考慮しても、対象地域では暖房用エネルギー消費が他地域に比べると少ないことがわかる。

なお、冷暖房以外に使用されているエネルギーについては、他地域とそれほど大きな違いは見られなかった。

図4 年間冷暖房用エネルギー消費量(推定値)

以上のように、対象地域の専用住宅におけるエネルギー消費量についてみると、年間消費量は、エネルギーの種類によって若干違いはあるが、トータルでは他地域よりやや少ない程度で大きな差異は見られなかった。冷暖房用以外のエネルギー消費量についても同様に大きな差異は見られなかった。しかし、冷房用エネルギーについては東京都、全国の3倍程度である大阪市よりもさらに多く、暖房用エネルギーは東京都、全国の2/3程度である大阪市のさらに2/3程度と著しく異なる結果となった。このことから、対象地域の夏期はかなり高温で過ごしにくく、逆に冬期も高温で暖房消費が少なくなっているものと考えられる。

また、併用住宅のエネルギー消費は、エネルギーの種類や用途により若干の差はあるが、専用住宅の約2倍と捉えることができる。

3. 温熱環境実態調査

3-1. 調査概要

この調査は、1998年2月上旬より継続しているものである。13戸の住戸を対象に、生活の中心となる部屋(一部住戸は例外)に温湿度計を設置してもらい、30分間隔で計測している。測定住戸の主な特性を表5に示す。今回は冬期・夏期に関して、温度と絶対湿度の時刻別値をプロットしその相関を見るとともに、時系列

変化についても検討する。なお、いずれも大阪管区気象台観測の外気温湿度と比較しつつ、測定住戸の温熱環境について考察する。測定期間は住戸間で多少異なるが、住戸同士の室内温熱環境の単純比較ではなく、外部環境と室内温熱環境との関係という観点より検討するため、測定期間の違いが及ぼす影響はそれほど大きくないと考えた。

ここでは、各期において測定住戸に多く見られた性状を平均的に示した住戸Aを中心に、それと差異の見られた住戸を取りあげている。なお、平均温度(表6)を見ると住戸Aは夏・冬とも他住戸に比してやや高いが、その変化特性、外気との相対関係を見ると一般的と考えられる。

表5 測定対象住戸の主な特性

住戸	構造	階数	築年	延べ床面積 [m ²]	居住人数 [人]	住宅の用途	測定期間	
							冬期	夏期
A	木造	3	—	87	4	居住専用	2/6~3/31	7/1~8/31
B	木造	2	S52	78	4	居住専用	2/7~3/31	8/24~8/31
C	木造	3	H1	120	4	居住専用	3/11~3/31	7/1~8/29
D	木造	1	—	16.2	1	居住専用	2/5~3/31	8/24~8/31
E	木造 +鉄骨造	3	S59	108	4	居住専用	2/5~3/31	7/1~8/24
F	—	—	—	—	—	居住専用	3/11~3/31	7/1~8/24
G ^{※2}	鉄骨造	4	H2	160	7	飲食店	2/5~3/31	7/1~8/24
H	木造	3	S45	43.2	3	豆腐店	2/12~3/11	7/1~8/24
I	木造	2	H8	59.5	5	皮革加工	2/12~3/31	7/1~8/24
J ^{※3}	—	—	—	—	—	酒店	2/5~3/31	7/1~8/31
K	木造	2	—	—	2	文具店	3/11~3/31	7/1~8/24
L	木造	3	S42	108	3	飲食店	2/26~3/11	7/1~8/31
M ^{※4}	—	—	—	—	—	自動車整備	2/5~3/31	7/1~8/24

「—」はアンケート未記入

※2 住戸Gでは、測定器が生活の中心となる室ではなく1階の飲食店部に設置されていた。

※3 住戸Mでは、測定器が生活の中心となる室ではなく1階のガレージに設置されていた。

※4 住戸Jは住戸Eの住人が経営する酒店の店舗。居住用住宅と店舗が別に建てられている。

表6 各期の平均室温(13戸平均と住戸A)

	13戸平均	住戸A
冬期(2,3月)	16.4℃	18.4℃
夏期(7,8月)	29.2℃	30.4℃

3-2. 温熱環境実態調査結果

(1) 冬期(1998年2月)

住戸Aでは外気に比べて高温高湿であった(図5左)。他の住戸もほとんどが同様の性状を示した。絶対湿度がかなり高くなっているのは、灯油式等の開放型暖房器具を用いているためと考えられる。電気式の暖房器具を主に用いている住戸では、これほど高い絶対湿度は見られなかった。住戸Aの温湿度の時系列変動(図6上、7上)を見ると、外気温変動と異なり室温変動には一日に複数のピークが見られる。室温上昇時に室内絶対湿度も急激に上昇している。これも灯油式等の暖房の影響と推定される。

一方、住戸Dでは外気と大きな差がない(図5右)。時系列変動からも、終日低温であることが伺える(図6下)。アンケート調査によると、住戸Dでは暖房は電気ストーブ1台のみによって行われており、局所的な採暖により生活しているものと考えられるが、適切な温熱環境が形成されているとはいえず、改善の必要があるものと思われる。

(2) 夏期(1998年8月)

住戸Aでは、室内の絶対湿度に外気よりもかなり低い値が見られる(図8左)。他の12戸のうち11戸でもこのような低い値が見られた。これは、冷房運転が行われているためと推定される。冷房の使用頻度は住戸により様々であるが、専用住宅よりも併用住宅で多用されている傾向が見られた(住戸Aでは室温が外気温と

同程度まで上昇しているが、調査対象地域における路地の昼間の気温は気象台観測値よりも2~3℃高い¹⁴⁾。時系列変動(図9上、10上)を見ると、外気温が上昇中に室温は下降し始め、それと同時に室内の絶対湿度も急激に低下している。この時点で冷房使用が開始されたと推定される。冷房が使用されていないと推定される時間帯では、30℃を上回っていることが多い。

住戸Cでは、室内の絶対湿度に著しく低い値は見られない(図8右)。時系列変動(図9下、10下)を見ると、室温変動は外気温変動が緩和された形状となっており、絶対湿度については外気と室内に大きな差異は見られない。したがって、住戸Cでは冷房が行われていないと推定される。室温を見るとほとんど30℃を上回

っている。

以上のように、冬期・夏期の対象地域の温熱環境を見ると、冬期には一部住戸において改善が必要と考えられるが、全体としては良好な温熱環境にあると言える。一方、夏期には冷房を使用しないと室温は30℃を下回することはほとんどなく、かなり過ごしにくい温熱環境であると考えられる。§2のエネルギー消費実態調査で明らかになった「対象地域では冷房用エネルギー消費量が非常に多い」という結果も、夏期の温熱環境が良好ではないということと表裏一体をなしているものと考えられる。何らかの改善策が必要な課題と言えよう。

図5 1998年2月 温度-絶対湿度相関 住戸A・D

図6 温度比較(外気・室内) 1998年2月 住戸A・D

図7 絶対湿度比較(外気・室内) 1998年2月 住戸A・D

図8 1998年8月 温度-絶対湿度相関 住戸A・C

図9 温度比較(外気・室内) 1998年8月 住戸A・C

図10 絶対湿度比較(外気・室内) 1998年8月 住戸A・C

4.路地空間の温熱環境解析

§2 のエネルギー消費量の実態調査より、対象地域での夏期の冷房エネルギー消費量が非常に多く、逆に冬期の暖房用消費量が少ないこと、§3 の温熱環境調査では、対象地域における夏期の室内環境は必ずしも快適な状態とは言えないことが明らかにされた。また、文献14)によると、対象地域の路地で測定された外気温は気象台観測値よりも2~3℃高く、室内環境悪化の一因となっていると考えられる。冷房用エネルギー消費量が他地域に比べ著しく多いのは、「屋外空間の暑さ→冷房用エネルギー消費量の増大」という単純な因果関係だけではなく、「外部環境の暑さ→クーラーの使用→屋外への排熱→外部環境の悪化」という悪循環の形成によるものと考えられる。したがって、この問題を解決するには室内温熱環境の改善だけでなく、周囲の外部環境も考慮に入れて改善策を考えていくことが必要となる。

密集住宅地域の再開発においては、集合住宅化とそれに伴うオープンスペースの確保という手法がしばしば採用されるが、通風効果よりも日射の影響が強くなり温熱環境的には必ずしも良くない¹⁴⁾ ことがある。またこうした手法では、これまで長年に渡って培われてきた地域の人間関係が損なわれるおそれがある。資源の有効利用の観点からも、既存の住宅を可能な限り有効に再生・活用していくことが望ましい。以上を考慮すると、路地空間を含む地域レベルでの温熱環境の改善が有効な方策の一つと考えられる。

本章では以上のことをふまえて、対象地域のエネルギー・温熱環境問題を考える際の基盤となる夏期の路地空間の温熱環境について、第2、3章の調査結果を用いて解析を行い、解析結果を実測結果と比較検討した上で、路地空間の温熱環境の改善策について考察する。

4.1.解析対象

本章では、路地空間の温度を均一とみなして非定常熱収支式を解き、各要因が温熱環境に与える影響を調べる。一般的には、路地は複雑な幾何学的形状を有する空間であるが、すべての住戸を同一の直方体に単純化し、路地の両側に同じ戸数だけ連なっているとすると、路地の端の住戸についても他の住戸と同じ条件下にあるものと考え、路地の側面では熱の流入が行われなるとする。

建物と外部空間を対象とした従来の研究には、二次元長方形市街地空間^{15)、16)} や連続覆付歩廊内部¹⁷⁾ における熱的性状の解析と評価を行ったものがある。特に文献15)、16)では、本研究とほぼ同じ対象についての詳細な検討がなされているが、本研究で対象とする路地空間より大きな空間を扱っている。また、建物側と都市大気側の伝熱を連成させたモデルによる詳細な解析^{18)~21)} も行われている。ただし、これらの研究では、本研究よりも対象の規模が大きく（入射日射とキャノピー内気流の制御という観点からすると）、建物とその四方の空間を基本構成単位としてそれらが面的に一樣に配置されているモデルを用いている。

本研究で扱う対象は、帯状の低層住宅棟と棟間の路地よりなる地域である。路地は水平方向を住宅群により、下方を地面により囲われているので、空気の流入はほぼ上空との間のみと考えることができる。本論文においては、この空気の流動を路地空間と上空との間の仮想的な換気により行われるとして解析している。なお、この場合に用いるべき仮想換気回数は多くの要因により左右され、路地空間内での気流分布と密接に関係するため、同一形

状モデルを用いた気流解析の結果²²⁾ から近似的に定めている。

本論文中で使用するモデルと記号を図11に示す。なお、図中の θ_{sw} 、 Q_w 、 Q_c 、 Q_{iw} については、路地の両側で同じ記号を用いているが、方位によりそれぞれの側で違う値となる。

図11 解析モデルと使用する諸量（路地断面図）

θ_o 、 θ_g 、 θ_i ：路地空間、上空、室内の温度 [℃]、 θ_{sw} 、 θ_g 、 θ_i ：壁表面、地表面、屋根表面の温度 [℃]、 Q_w 、 Q_g 、 Q_c 、 Q_{iw} ：壁、地面、上空、室外機から路地空間へ流れる熱流 [W]、 Q_i ：路地空間で吸収される反射日射量 [W]、 Q_{sw} 、 Q_{sg} ：壁、屋根を通して室内へ流れる熱流 [W]、 Q_i ：各住戸群での発熱量 [W]

4.2.路地空間空気の熱収支式

$$c\gamma V \frac{\partial \theta}{\partial t} = Q_w + Q_g + Q_u + Q_c + Q_i \quad \dots (1)$$

$c\gamma$ ：空気の容積比熱 [J/m³K]、 V ：路地空間の体積 [m³]、 t ：時間 [s]

ここで、熱流 Q_w 、 Q_g 、及び室内への流入熱流 Q_{iw} 、 Q_{ir} は次式で与えられる。

$$\text{壁から路地への熱流： } Q_w = S_w \alpha_o (\theta_{sw} - \theta) \quad \dots (2)$$

$$\text{地面から路地への熱流： } Q_g = S_g \alpha_o (\theta_g - \theta) \quad \dots (3)$$

$$Q_{iw} = S_w K_w (\theta_{solw} - \theta_i) \quad \dots (4)$$

$$Q_{ir} = S_r K_r' (\theta_{solr}' - \theta_i) \quad \dots (5)$$

α_o ：外気側総合熱伝達率 [W/m²K]、 S_w 、 S_g 、 S_r ：壁、地面、屋根の面積 [m²]、 K_w ：壁の熱貫流率 [W/m²K]、 K_r' ：水分蒸発を考慮したときの屋根の等価熱貫流率²¹⁾ [W/m²K]、 θ_{solw} ：壁表面の相当外気温度 [℃]、 θ_{solr}' ：水分蒸発を考慮したときの屋根表面の相当外気温度²¹⁾ [℃]

壁表面の温度については、近似的に定常状態として取り扱い、次式から求める。

$$\alpha_o (\theta_{sw} - \theta_{sw}) = \frac{1}{1/K_w - 1/\alpha_o} (\theta_{sw} - \theta_i) \quad \dots (6)$$

地表面の温度は、深さ5mの地点で地盤温度が15℃一定に保たれているとした。ただし、地表面においては水分蒸発も考慮する。路地空間と上空での熱の交換については、仮想換気回数を設定し、次式によって計算する²⁵⁾。

$$Q_u = nc\gamma V (\theta_o - \theta) \quad \dots (7)$$

n ：路地空間と路地上空間の仮想換気回数 [1/h]

室外機からの排熱量は、冷房負荷（外気から室内へ流入する熱量と室内での発熱量の和）と冷凍機の運転に必要な熱量の和であるから、次のように表すことができる。

$$Q_c = (Q_{iw} + Q_{ir} + Q_i) \left(1 + \frac{1}{COP} \right) \quad \dots (8)$$

COP：冷凍機の成績係数 [-]

また、壁や地面で2回目に反射される日射量はすべて路地空間の空気に吸収されるとする。これが(1)式中の Q_i である。

4.3. 解析条件（基準モデル）

外気温には大阪の8月の値²³⁾を、日射量としては大阪標準気象データを用いる（図12）。各面への入射日射量は、形態係数を考慮して計算する。

東西の住戸群はそれぞれ8戸から構成されているとし、1戸の寸法は間口4m、奥行き10m、高さ6m、路地の幅は3mとする。住宅の構造は調査対象地域に多く見られた木造とし、壁・屋根の熱貫流率は文献²⁴⁾の値を用いる。各伝達率には以下の数値を用い、物性値については表7に示す。

$$\begin{aligned} \text{外気側総合熱伝達率} &: \alpha_o = 23.2 \text{ [W/m}^2\text{K]} \\ \text{室内側総合熱伝達率} &: \alpha_i = 9.3 \text{ [W/m}^2\text{K]} \\ \text{外気側湿気伝達率} &: \alpha_{o'} = 60.0 \text{ [kg/m}^2\text{hkg/kg]} \end{aligned}$$

各住戸群での室内発熱 Q_i については、人体発熱 Q_h と冷房用以外（照明・家電機器等）の電力消費量 $E_{\min}$ を考え、第2章の調査結果をもとに（9）式を用いて定める。

$$Q_i = \left(\frac{E_{\min}}{30 \times 24} + Q_{h_s} \times R_m \right) \times 8 \quad \cdots (9)$$

$E_{\min}$ ：冷暖房用以外の電力消費量平均（専用住宅・併用住宅各々の平均に戸数比を加味して算定）[Wh]、 Q_{h_s} ：人体発熱（顕熱）[W]、 R_m ：専用住宅（24戸）の一世代当たり平均居住人数[人]

第3章の温熱環境調査の結果では、専用住宅と併用住宅で室温に大きな違いがあるということはなかった。そこで、本解析では専用住宅の中で8月の冷房用エネルギー消費量と冷房用以外の電力消費量の両方が専用住宅24戸の平均に近い住戸を代表的住戸とみなし、その住戸の8月の平均日変動室温を用いた（図13）。冷房は、この室温を実現するために使用されるとする（暖房が必要となる場合は運転しない）。

仮想換気回数については、同一モデルを用いて行われた気流解析結果²⁵⁾から $n=300$ [1/h]とする。また、 $COP=2.5$ [-]とする。

以上の条件を用いて、30日分の非定常計算を行った。

図12 大阪の8月の平均外気温と平均日射量
(日射量は7/25～8/7の各時刻の平均値)

図13 代表的住戸の8月の室温日変動

表7 各物性値

	熱伝導率 [W/mK]	熱貫流率 [W/m²K]	日射吸収率 [-]	容積比熱 [kJ/m³K]
壁（大壁）	—	1.41	0.70	—
屋根	—	1.64	0.70	—
地面（アスファルト）	0.73	—	0.85	2055.8
土	0.61	—	—	1498.7
空気	—	—	—	1.30

4.4. 解析結果

解析は南北方向に延びる路地（今後、南北路地と呼ぶ）と東西方向に延びる路地（東西路地）について行ったが、路地の方向によって解析結果が大きく異なることはなかったため、ここでは南北路地の解析結果を示す。

対象地域にある路地で実測された気温¹⁴⁾と解析結果を比較したものが図14である。路地気温の解析結果は実測よりも約1°C低い。これは、時間あたりの内部発熱として、エネルギー消費量の月積算値を $30[\text{日}] \times 24[\text{時間}]$ で除した値を用いたことを考慮して、計算では日射量、室温、上空温（気象台）にも8月の平均を用いたが、それらは実測が行われた日に比べ小さい値となっていたためと考えられる。そこで、日射量には大阪標準データを実測値¹⁴⁾（対象地域に建つ高さ約20mの建物屋上）との9:00～16:00の平均の比率で補正した値を、室温と上空温には8/11と8/12の日変動平均を用い、解析を行った結果が図15である。得られた路地気温は、実測とおおむね一致している。このことから、本解析モデルは非常に簡易化、単純化されたものではあるが、測定対象地域の温熱特性を一定程度表現しているものと考えられる。

図14 解析値と実測値¹⁴⁾の南北路地温度の比較

図15 補正（日射・室温・上空温）解析値と実測値¹⁴⁾の南北路地温度の比較

各面に入射する日射量を見ると、屋根面への入射日射量が非常に大きいことが分かる（図16）。壁面や地面の温度は、入射する日射量の変動に応じて変化している。日射がない夜間には、地面の温度だけが外気温よりも高くなる（図17）。

路地空間に流入する熱量のうち、空調機の室外機から路地空間へ排出される熱量は日中に大きな割合を占める（図18）。室外機からの排熱が路地空間の温熱環境に与える影響の大きさが伺える。

ただし、冷房の使用が増える日中の室外機からの排熱を形成する最大の要因は、日射によって表面温度が上昇した屋根を通して室内に流入する熱流であり（図19）、ここでも日射が大きく影響

している。上空から路地空間へ流れる熱量は常に負の値（図 18）で、路地空間から上空へ高温の空気が流出することによって、熱収支が保たれている。路地空間で吸収される反射日射量の割合は小さく（図 18）、ここで設定した条件下（基準モデル）では、2 回目以降の反射日射量の詳細な検討は必要ない。

路地の方向に関わらず、「各面に入射し、吸収される日射量」「室外機からの排熱」「上空との空気交換による熱移動」が、路地空間の温熱環境を大きく支配していると言える。

図 16 各面に入射する日射量（南北路地）

図 17 各部温度の日変化（南北路地）

図 18 路地空間に流入する各熱量（南北路地）

図 19 室外機からの排熱の内訳（南北路地の東側室外機）

4.5.路地温熱環境の改善

前述の解析モデルに基づき、路地空間の温熱環境改善策を検討した結果のうち、主なものを以下に示す。いずれも定性的には明らかなものであるが、簡易なモデルを用いていることに伴う制約を前提に、定量的な情報を得ることを目的としている。

(1) 各面に入射し、吸収される日射量を減少させる。

住宅の路地に面する壁面上の底に水平に 1m の底を設置した場合の路地空間温度を図 20 に示す。仮想換気回数の値によって異なる影響が現れる。底を設置した後の仮想換気回数が基準モデルの 300 回と変わらない場合には、最大で約 0.6°C の路地空間温度の低下が得られる。しかし通常は、底を設置すると上空との換気回数は少なくなるため、設置後の換気回数を精度良く推定する必要がある。

(2) 室外機からの排熱量を減少させる。

室外機からの排熱の内訳を示す図 19 より、壁を通して室内に流入する熱量に比べ、屋根を通して室内に流入する熱量が非常に大きい。このような地域では、密集していることにより壁への入射日射量が小さくなるためと考えられる。この特性を考慮すると、屋根と壁の両方を同程度に断熱するより、屋根の断熱を徹底することにより路地空間の温熱環境が大きく改善されることがわかる。

さらに、室外機からの排熱に着目し、地域熱供給システムなどの手法²⁶⁾により「室外機からの排熱を路地空間に排出しない」として解析を行うと、日中で約 1.1°C も路地空間温度は低下する（図 21）。室外機からの排熱の処理方法を考慮することにより、路地空間の温熱環境が大きく改善される可能性のあることがわかる。

(3) 上空との換気を適切に制御する。

基準状態から「仮想換気回数 n を大きくする」と、路地空間温度は低下する。路地空間と上空との間の換気に及ぼす上空の風の影響を考慮して、屋根や底の設計をする必要がある。ただし、室外機からの排熱の処理と底による入射日射量の制限により、路地空間の温度を上空の温度よりも低くすることが可能な場合には、上空との換気はむしろ少ない方が良くと考えられる。

種々の改善案を組み合わせたモデルについての解析も行った（図 21）。室外機からの排熱を 0 にして、路地空間に流入する熱量を大幅に減少させた場合、底を設けることで換気回数が 200 回に減少しても、路地気温は上空の温度より最大でも 0.3°C 高い程度であり、換気回数の減少によるデメリットはほとんどなく、底の日射遮蔽効果が大きくなっている。さらに散水を行うと、路地気温は上空温度よりも低くなり、底設置による換気回数減少はプラスに作用していると言える。

図 20 底を設置した場合の路地空間温度（南北路地）

図 21 改善案を組合わせた場合の路地空間温度（南北路地）

5. おまけ

本研究では大阪市の密集住宅地を対象にエネルギー消費及び温熱環境の実態調査を行い、以下のことを明らかにした。

対象地域の専用住宅におけるエネルギー消費量については、年間消費量では、エネルギーの種類によって若干違いはあるが、トータルでは他地域よりやや少ない程度で大きな差異は見られない。冷暖房用以外のエネルギー消費量についても同様に大きな差異は見られなかった。しかし、冷房用エネルギーについては、東京都、全国の3倍程度である大阪市よりもさらに多く、暖房用エネルギーは東京都、全国の2/3程度である大阪市のさらに2/3程度と著しく異なる結果となった。また、併用住宅のエネルギー消費は、エネルギーの種類や用途により若干の違いはあるが、およそ専用住宅の2倍と捉えることができる。

対象地域の冬期、夏期の温熱環境については、冬期には一部住戸において改善が必要と考えられるが、全体としては良好な温熱環境にあると言える。逆に、夏期には冷房を使用しないと室温は30℃を下回することはほとんどなく、かなり過ごしにくい温熱環境であると考えられる。

以上の調査結果から明らかとなった夏期の温熱環境の問題点を検討するため、調査結果に基づいて路地空間の温熱環境の解析を行った。その結果、路地空間と路地上空間での空気交換量、路地空間に入射する日射量、室外機からの排熱（主として屋根を通して室内へ流入する熱量に由来する）が、路地空間の温熱環境を大きく支配していることがわかった。

路地空間の温熱環境の主な改善策としては、

- ・屋根を断熱構造にする（壁の断熱に比べ非常に効果大）。
- ・室外機からの排熱を路地空間に排出しない処理方法を採用する。あるいは、室外機の位置を路地上部に移動する²⁵⁾。
- ・適当な庇を設置する（入射日射量の減少と上空との換気回数の減少の双方を考慮する必要有り）。
- ・地面や屋根への散水を行う。

などが挙げられる。

【謝辞】

本研究は地域環境計画委員会（委員長 松本衛）のエネルギー小委員会の下で行われた研究の一部である。

本調査を行うにあたり、街づくり委員会、西成区の調査対象住戸、関西電力、大阪ガスの方々には多大なる協力をいただきました。また、東京理科大学井上隆助教授からは貴重なアドバイスをいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

【注】

銭湯を利用している独立住宅は現在では減少しつつあるが、世帯あたりの

銭湯²⁷⁾を大阪市24区で比較すると、西成区は3番目であり、銭湯を利用する世帯が比較的多い。本調査結果は、当該地域における偏ったサンプリングに基づくものではないと推定される。

【参考文献】

- 1) 通産資料調査会：1999・2000 資源エネルギー年鑑
- 2) 西田勝他：九州地域における都市・建築の未利用エネルギー有効利用に関する総合的研究、(研究課題番号 07305028)、平成7年度～平成8年度科学研究費補助金(基盤研究(A))研究成果報告書
- 3) 西田勝他：九州・福岡における熱需要量の推定－日本全国の地域冷暖房導入可能性に関する調査研究・その1－、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道) D-1, p.681-682, 1995.8
- 4) 下田吉之他：都市未利用エネルギーの活用可能性評価手法に関する研究第1報 大阪市における各熱源の利用可能量と熱需要に関する調査と分析、空気調和・衛生工学会論文集, No.61, p.67-77, 1996.4
- 5) 下田吉之他：都市未利用エネルギーの活用可能性評価手法に関する研究第2報 未利用熱源水供給ネットワークの省エネルギーポテンシャル、空気調和・衛生工学会論文集, No.61, p.1-11, 1996.4
- 6) 尾島俊雄研究室：建築の光熱水原単位〔東京版〕、早稲田大学出版部、1995.6
- 7) 澤地孝男他：用途別エネルギー消費量原単位の算出と推定式の作成 全国的調査に基づく住宅のエネルギー消費とライフスタイルに関する研究(第1報)、日本建築学会計画系論文報告集, No.462, p.41～48, 1994.8
- 8) 福島造成他：九州地域における住宅エネルギー消費構造に関する研究、空気調和・衛生工学会論文集, No.57, p.35-48, 1995.2
- 9) 石田健一：戸建て住宅のエネルギー消費、日本建築学会計画系論文集, No.501, p.29-36, 1997.11
- 10) 三浦秀一：全国における住宅の用途別エネルギー消費と地域特性に関する研究、日本建築学会計画系論文集, No.510, p.77-83, 1998.8
- 11) 中野勝敏他：東京都における住宅用エネルギー消費実態 その1 エネルギー消費量の経年変化、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道) D-2, p.213-214, 1995.8
- 12) 村越千春他：東京都における住宅用エネルギー消費実態 その2 用途別エネルギー消費量の推計、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道) D-2, p.215-216, 1995.8
- 13) 大阪市計画調査局企画調査部統計調査課：第86回 大阪統計書 平成10年版
- 14) 豊福晃史他：路地空間における夏季熱環境の実態とその改善方策に関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告集, 第39号・環境系, p.5-8, 1999.6
- 15) 中村泰人、平岡久司：二次元長方形市街地空間における表面の温度および熱流に関する研究、日本建築学会計画系論文報告集, No.367, p.8～14, 1986.9
- 16) 中村泰人、平岡久司：二次元長方形市街地空間の路上にある人体の熱負荷に関する解析的研究、日本建築学会計画系論文報告集, No.369, p.12～21, 1986.11
- 17) 辻原万規彦他：東南アジアを中心に分布する連続覆歩廊内部の温熱環境に関する研究、日本建築学会計画系論文報告集, No.515, p.105～112, 1999.1
- 18) 松尾陽他：都市キャノピーにおける建築からの放散熱とその影響 その1 建築の放散熱に関する伝熱モデル、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道) D-1, p.585-586, 1995.8
- 19) 西岡真輪他：都市キャノピーにおける建築からの放散熱とその影響 その2 建築の放散熱に関するシミュレーション、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道) D-1, p.587-588, 1995.8
- 20) 谷本潤他：建築一都市一土壌連成系モデルによる都市高温化要因の定量的比較に関する研究 第1報 理論構成手法と基本解、日本建築学会計画系論文集, No.504, p.87-93, 1998.2
- 21) 谷本潤他：建築一都市一土壌連成系モデルによる都市高温化要因の定量的比較に関する研究 第2報 数値実験による要因効果特性解析、日本建築学会計画系論文集, No.510, p.53-60, 1998.8
- 22) 鉢井修一：湿った建築壁体の熱的特性に関する基礎的研究、京都大学学位請求論文, p.169-171, 1986.4
- 23) 気象庁：気象庁月報, 1998.8
- 24) 日本建築学会：建築設計資料集成1 環境, p.123, 1978.6
- 25) 辻政宏、鉢井修一：住宅密集地域の温熱環境解析、日本建築学会近畿支部研究報告集, 第39号・環境系, p.73-76, 1999.6
- 26) 七岡寛他：地下苦熱水層を利用した水熱源ヒートポンプによる熱供給システム、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国) D-1, p.621-622, 1999.9
- 27) <http://www.os.xaxon.ne.jp/~hit/sento.htm#大阪区域別銭湯リスト>

(1999年12月2日原稿受理, 2000年5月16日採用決定)