

都市域の家庭の夏季空調エネルギー負荷と 家族形態との関連分析

上野賢仁¹・柴田学²・谷川寛樹³・井村秀文⁴

¹正会員 博(工) 崇城大学講師 工学部環境建設工学科(〒860-0082 熊本市池田4-22-1)

²正会員 修(工) 株式会社ニュージェック 大阪本社総合計画・環境部環境室(〒542-0082 大阪市中央区島之内1-20-19)

³正会員 博(工) 和歌山大学助手 工学部環境システム学科環境計画系(〒640-8510 和歌山市栄谷930 番地)

⁴正会員 工博 九州大学大学院教授 工学研究院附属環境システム科学研究センター(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

福岡市域を解析対象として、都市気候モデルによる計算結果、世帯の属性分布情報、建築モデルを組み合わせた計算手法を用いて、家庭の夏季空調エネルギー負荷と家族形態とを関連付けて解析した。家族形態として世帯の構成を考え、5つのカテゴリーを想定し、計算に取り入れた。また、将来の家族形態(世帯構成)の変化として「女性の社会進出」と「世帯人員の減少」を仮定し、この変化による都市域の家庭の夏季空調エネルギー負荷の変化を計算した。この結果をもとに、家族形態の変化と都市域の家庭の夏季空調エネルギー負荷との関連について定量的に考察した。

Key Words : *urban climate, heat island, energy load of air conditioning, house model, constitution of family*

1. はじめに

我が国のエネルギー消費量を押し上げているのは、運輸部門とともに民生部門である。特に都市では、地球温暖化への影響のみならず人工排熱がヒートアイランド現象の一因となっていることから、エネルギー消費量の削減が社会的要請となっている。現在、家庭部門のエネルギー消費量はその約4割を電力に頼っており、電力依存度は年々増大している。また、夏季の冷房負荷増大は電力需要のピーク形成に影響を与えるため、これが電力供給体制を決める主要な要素となる。発電所の建設・運用には多大な社会的コストやリスクを払っていることから、都市域における夏季の冷房用エネルギー負荷の持つ意味は大きい。

家庭部門における空調エネルギー負荷を変動させる要因には、外気温、住居の周辺環境、住宅の熱的特性、空調機器の能力といった要因(外的要因)のほか、ライフスタイルや環境意識といった生活者自身のもつ要因(内的要因)が存在する。ここで、周辺環境やライフスタイルとエネルギー消費の関係については、アンケート調査を実施・分析した例がある¹⁾。また、住宅の熱的特性と空調用エネルギー負荷の関係については、建築分野で積み上げられてきた貴重な研究成果を活用することができる^{2),3)}。しかし、外的要因、内的要因と空調用エネルギーの関係を空間的、統合的に関連付け

てモデル化した例は少ない。仮に、このようなモデルを構築することができれば、都市気候の変化や、住宅の断熱構造や生活者のライフスタイルの変更が空調用エネルギー負荷に与える影響を、その寄与率とともに示すことができる。

本研究では、以上のような考えをもとに色々な要因を関連付けた都市域の空調用エネルギー負荷推計モデルの構築を最終的な目的に設定し、外的要因として室外気温、住宅の総熱貫流率、空調床面積、内的要因として世帯属性性別の空調設定温度、空調稼働率、等を構成要素とするモデルを構築する。筆者らはこれまでの研究⁴⁾で、福岡市域を解析対象として数値モデルによる計算結果と建築モデルを統合することにより、空調温度の設定(25℃、28℃)に対する都市域の時間・空間的な空調エネルギー需要の推計を試みた。この解析方法は、精度向上等の課題が残されてはいるが、今後のGIS技術の進歩や統計情報等の整備やライフスタイルモデルの導入等による改善でさらに発展させることが可能である。将来的には、我々の身近な生活から都市域の熱環境までを関連付けた一貫した議論や検討が可能になると思われる。本研究では、この推計方法を基礎として、生活者のライフスタイルと密接に関係する世帯の家族形態を取り上げ、その違いによる空調稼働パターンを導入することによりエネルギー消費への影響について検討した。この方法は、「世帯分布情報」

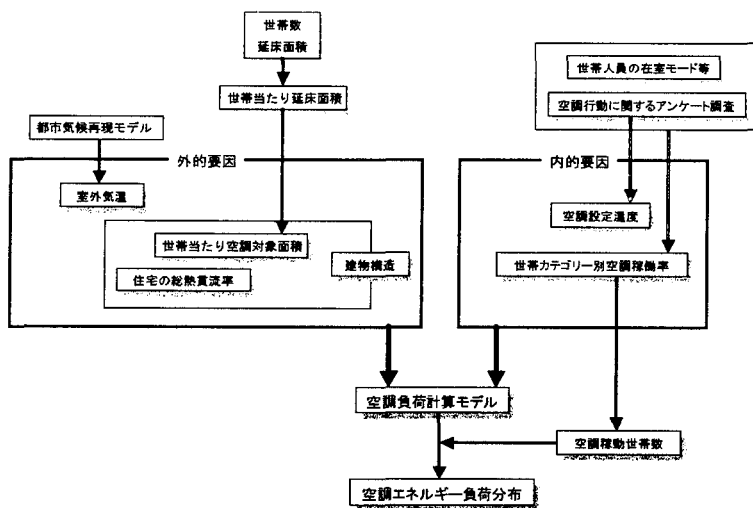


図-1 研究の流れ

に「原単位」を乗ずる基本的な計算方法を改良したものであり、住宅構造、都市域の気温分布、ライフスタイル、空調エネルギー消費等を同時に関連付けて議論できるという利点があり、また、得られる情報次第では、より詳細な計算も可能な点で発展性がある。

2. 解析内容

(1) 解析の流れ

本研究の解析の流れを図-1に示す。空調エネルギー負荷を変動させる要因として、空調床面積や総熱貫流率などの住宅構造や室外気温といった生活者を取り巻く外的要素による要因と、空調機器稼働率や空調設定温度といった生活者自身によって決定される内的要素による要因を考える。外的要因である建物構造による影響は、建物の空調の対象となる部屋に対して、仮定した単室空調モデルに基づいて計算した。この計算方法は、基本的には前報⁴⁾と同様である。次に、内的要因の家族形態による影響は、仮定した世帯構成ごとに設定する空調機器の稼働率を計算に反映させることで表現した。なお本研究では、単身世帯以外は戸建住宅を、単身世帯の場合は集合住宅を想定している。

具体的には、まず世帯属性別の世帯数・総延床面積に関する地域メッシュ統計⁵⁾から世帯当たりの延床面積を求めた。次に、空調の対象となる部屋の床面積を、2人以上世帯人数の世帯で世帯当たり平均総延床面積の一律10%（平均12m²）、単身世帯の集合住宅で50%（平均10m²）とした。なお、前報⁴⁾では一律20%としたが、今回の計算では世帯の属性に応じて異なる数値を仮定した。この数値について、信頼できる現実的な値

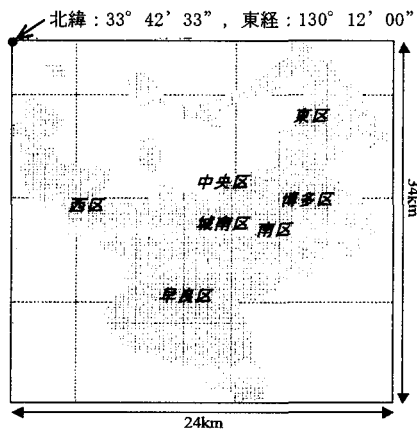
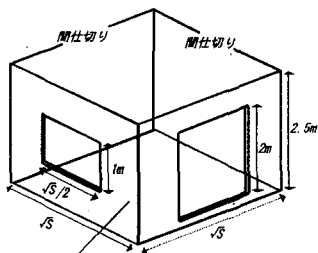


図-2 解析対象範囲

を設定するためには別途詳細な調査が必要である。空調機器の稼働率は、エネルギー計量分析センター⁶⁾と日本動力協会⁷⁾の世帯属性とライフスタイルに関する調査結果から求められる世帯カテゴリー毎の空調に関する行動パターンをもとに設定した。ライフスタイルの違いを表す因子としては意識や行動等も考えられるが、それらの中でも世帯の構成人員は最も影響の大きい要因であると考えられるため、本研究ではこれをパラメータとして用いることにした。

筆者らが数値モデルで計算した福岡市域の計算結果（再現された室外気温⁸⁾と、建物構造による影響を考慮するための単室空調モデル（住宅に対して空調対象床面積を床面積とする空調部屋を仮定し、この部屋に対して一定の熱的特性を備えた単室モデル）によって、空調設定温度を保つために必要な熱負荷を算定した。



空調床面積 $S[m^2] = \begin{cases} 1 \text{ 棟当り平均床面積} \times 0.5 \text{ (単身世帯)} \\ 1 \text{ 棟当り平均床面積} \times 0.1 \text{ (その他)} \end{cases}$

$$QSH = K_t (\theta_r - \theta_c)$$

$$K_t = \sum K_k A_k H_k + c \rho_a V$$

QSH: 空調顕熱負荷[J/h], K_t : 総熱貫流率[J/hK], θ_r : 外気温(計算気温)[K], θ_c : 空調温度(冷房設定温)[K], K_k : 部位kの熱貫流率[J/m²hK], A_k : 部位kの面積[m²], H_k : 温度差係数[-], c : 空気の定圧比熱[J/kgK], ρ_a : 空気の密度[kg/m³], $V (=n \times v)$: 換気量[m³/h] (n : 換気回数[回/h], v : 建物内の気積[m³])

図-3 単室空調モデルの概要

表-1 建物の諸定数

定数	戸建住宅
壁・天井・床の熱貫流率 (J/m ² hK)	7.49×10^3
ガラス窓の熱貫流率 (J/m ² hK)	2.07×10^4
$c \rho_a$ (J/m ³ K) (293.15K)	1.21×10^3
居室と外気の温度差係数	1
居室と床裏の温度差係数	0.6
間仕切りの温度係数	0.7
換気回数 (回/h)	3
床から天井までの高さ (m)	2.5

表-2 世帯構成カテゴリー

カテゴリー	地域メッシュ統計	構成人員の仮定
世帯構成1	単身世帯	有業者
世帯構成2	2人世帯	夫婦
世帯構成3	3人世帯	夫婦+子供
世帯構成4	4人世帯	夫婦+子供×2
世帯構成5	5人～世帯	夫婦+子供×3～

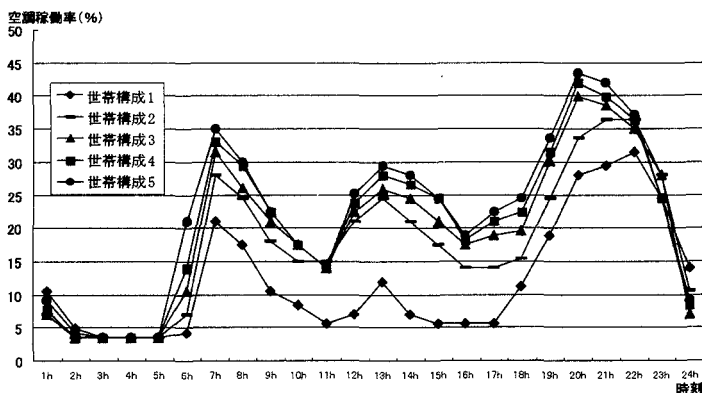


図-4 世帯構成カテゴリー別空調稼働率

図-2は解析対象範囲を示したものである。東経130° 12' 00", 北緯33° 42' 33" を北西端始点とする福岡市行政区域を覆う東西24km, 南北34kmの矩形範囲を設定し、全域を計算用1kmメッシュに区切った。解析対象日は8月上旬の平日を設定した。

(2) 空調負荷推定モデルの概要

a) 単室空調モデル

計算に用いたモデルは、前報⁴⁾と基本的に同じものである。住宅構造による空調負荷への影響は、図-3に示す瞬時定常・一方位単室モデル⁵⁾により算定する。基本式は図-3中に示す通りで、壁体・床・天井・ガラス窓等の各部位を通じて室内に流入する熱フラックスの総量に室内外の気温差を乗じることで空調負荷を算定する。外気温の時空間分布は前述の都市気候数値モデルより求めた値を用いる。8月上旬の気象観測データを境界条件とし、都市空間全域において24時間分のシ

ミュレーションを行ったものである⁶⁾。日本動力協会⁷⁾によれば、空調温度は暑さを凌げる程度に設定する割合が多く、世帯属性によらずほぼ一定温度であるため、設定温度は全ての世帯構成カテゴリーで一律26℃とした。計算に用いた建物の諸定数を表-1に示す。

b) 空調機器の稼働率

世帯構成カテゴリーごとの空調機器稼働率の日変化について詳しい調査例が入手できないため、次のような方法で稼働率を設定した。まず、戸建住宅世帯を世帯人数別に5つのカテゴリーに分配した。世帯カテゴリーの世帯構成は、表-2に示す対応関係を仮定した。次に、エネルギー計量分析センターの調査⁸⁾により求められる世帯構成人員別の空調部屋在室モードを参考に、世帯構成カテゴリーごとの空調機器の稼働率を設定した(図-4)。なお、空調負荷計算の精度を向上させるためには、実際の住宅を対象に詳細な調査が今後必要である。

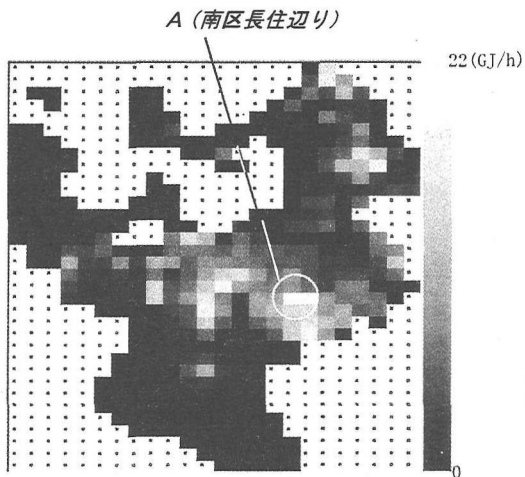


図-5 戸建住宅部門の空調用エネルギー消費分布
(13時、基本的な原単位法による)

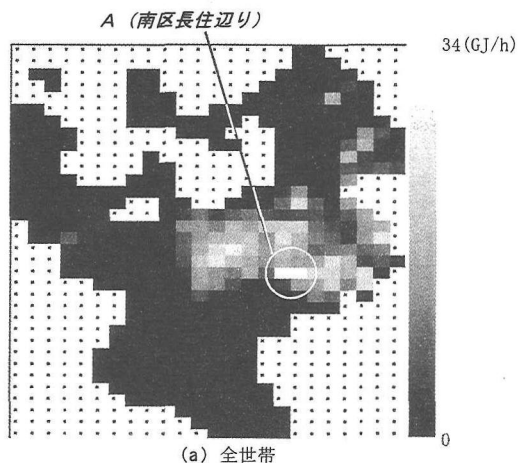
3. 解析結果

(1) 空調負荷の計算結果

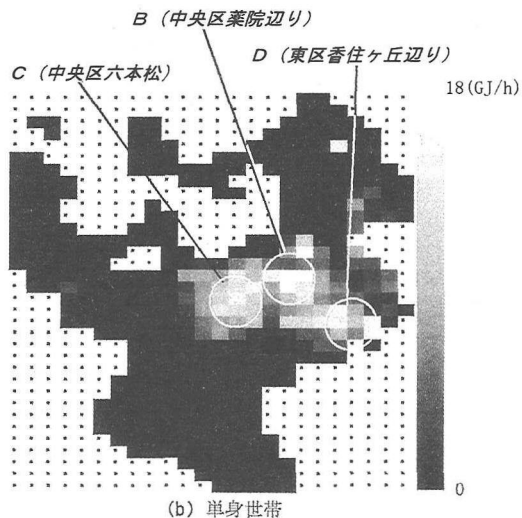
図-6に全世帯、単身世帯、4人世帯の13時における空調負荷分布の計算結果を示す。また比較のために、図-5に季節別時刻別用途別エネルギー消費原単位を用いた夏季の戸建住宅の空調用エネルギー消費分布図を示す。エネルギー消費原単位は、福岡市についての数値がないため、一ノ瀬ら⁹⁾の東京23区において算出された「独立専用住宅」・「夏季」・「冷房用」・「13時」の $4.48 \times 10^5 \text{ J/m}^2\text{h}$ ($=107 \text{ kcal/m}^2\text{h}$) を用いた。なお、この値は全て床面積ベース(空調が不要な床面積を含む)であるため、図-5は単純に床面積の分布情報に乗じて計算したものである。

図-5と図-6(a)～(c)は、それぞれ空調エネルギー消費の分布と空調負荷の分布であり、数値を単純比較することはできないが、分布形状を比較してみると、基本的な原単位法で求めた空調エネルギー消費分布よりも、本論文の計算方法によって求めた空調負荷の分布の方が数値の高い範囲が狭くなっている。また、図-6(b)を見ると、中央区や博多区などの市内中心部では空調負荷が大きく見られていることがわかる。これは、原単位法による計算では、用いた床面積当たり原単位が戸建住宅の平均的な値であるため、図-5は住宅分布情報に対応した平均的な結果になり、一方、図-6では家族形態を考慮した結果、単身者が多く居住する地域での空調負荷は大きく、多人数世帯が多い地域は小さく算出されたことが理由として考えられる。

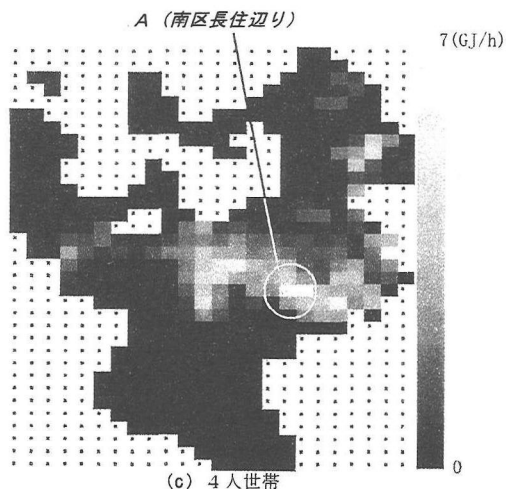
図-6(a)は、世帯の平均的な値を用いて計算した



(a) 全世帯



(b) 単身世帯



(c) 4人世帯

図-6 空調負荷の計算結果 (13時)

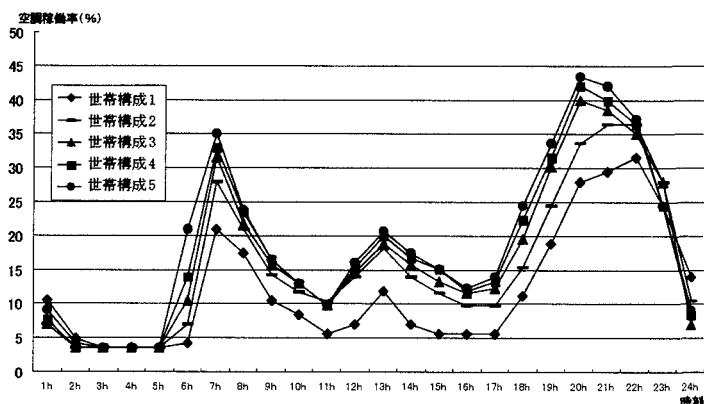


図-7 家族形態（世帯構成）変化後の空調稼働率

図-5よりも分布形状が現実のものに近いと考えられるが、空調用エネルギー消費と空調負荷とを単純に比較することはできない。両者を比較するためには、空調機器のCOP(成績係数)等を考慮しなければならない。また、空調負荷の計算においては、空調面積や熱貫流率等のパラメータ値に不確定なところが存在している。今後、より精密なモデルの開発や空調行動に関する調査を行う必要がある。なお、空調用エネルギー消費量は個々の家庭に導入されている空調システムやCOPの相違、室外機の設置場所等が影響し、空調負荷との直接的な対応関係は一概には決められないことにも注意が必要である。

次に、図-6(a)～(c)で、世帯構成と空調負荷の関係をみると、全世帯の分布形状は4人世帯のそれとよく似ている。最大負荷はどちらも地域A(南区長住辺り)で発生している。この地域は典型的な過密住宅地であり、13時では、主に主婦層の昼間在宅率が高いことが理由として考えられる。一方、単身世帯の空調負荷分布は都心部寄りになっている。最大負荷発生場所は地域B(中央区薬院辺り)で、学生単身者が多く居住する地域C(中央区六本松)、地域D(東区香住ヶ丘辺り)が高負荷となっているのも特徴的である。

13時における市内の全空調負荷量は、全世帯合計で1,650 GJ/h、単身世帯合計で828 GJ/h、4人世帯合計で240 GJ/hである。単身世帯層の昼間在宅率は低い、福岡市の全世帯数のうち約1/3を占めており、トータル空調負荷量には大きな影響を与えている。

(2) 家族形態の変化が空調負荷に与える影響

家族形態は社会的トレンドの影響を強く受けながら変化するものである。本研究では「女性の社会進出」と「世帯人員の減少」を取り上げた。「女性の社会進出」は都心部、郊外に関わらず都市全域に当てはまる傾向で

あるのに対して、「世帯人員の減少」は都市内での地域格差が大きいという特徴がある。これは、地価高騰や交通渋滞の慢性化などによる影響で郊外への流出が続く一方、都心部の住宅高層化やワンルーム化が進み、小数ではあるが単身者が郊外から移り住んできているためである。「女性の社会進出」により、複人数世帯における昼間の空調稼働率は下がると考えられる。また、「世帯人員の減少」は新たな世帯が都市内で生まれることを意味し、世帯人員当たり空調負荷原単位が大きい世帯数の増加につながる。以上を踏まえ、家族形態(世帯構成)の変化を仮定した。具体的には、①博多区、中央区の単身世帯割合を10%増加させ(総世帯数は固定し、その他を割合に応じて減じた)、同時に、②単身世帯以外の世帯において50%の女性が有職者になると仮定し、午前9時から午後5時までの空調稼働率は単身者の空調稼働率との加重平均値を取る(図-7)。

図-8は、13時の空調負荷計算結果を示したものである。13時における市内の全空調負荷量は、全世帯合計で1,554 GJ/h、単身世帯合計で933 GJ/h、4人世帯合計で182 GJ/hである。

家族形態変化前の図-6と比較すると、全世帯では、市内の全空調負荷量は96 GJ/hの減少(5.82%減)となった。単身世帯では、世帯割合を増加させた博多区と中央区で高負荷の地域が拡大している。最大負荷発生場所は変化前と同様に地域B(中央区薬院付近)であり、その負荷量は22 GJ/hで変化前の19 GJ/hに比べて約16%の増加が見られた。市内の全空調負荷量は105 GJ/hの増加(12.7%増)となった。4人世帯の計算結果を見ると、市内全域で空調負荷は58 GJ/hの減少(24.2%減)が認められた。最大負荷発生場所の値は6 GJ/hで、変化前の7 GJ/hに比べて約14%減少した。

本研究で仮定した世帯構成の変化により、都市域全

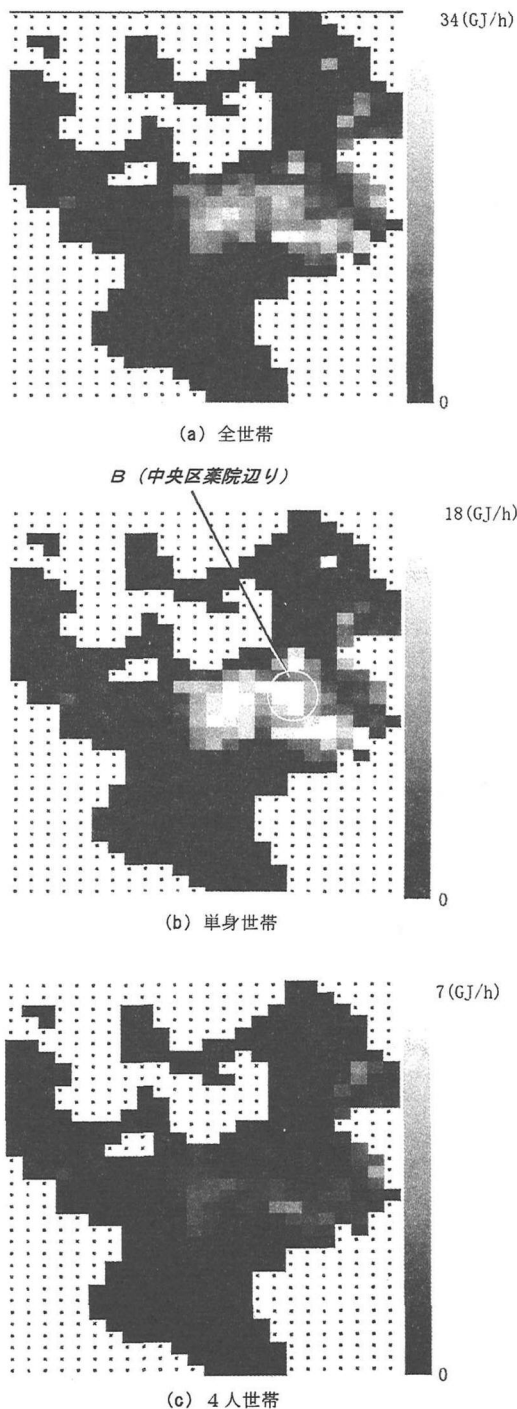


図-8 家族形態（世帯構成）変化後の
空調負荷計算結果（13時）

体で見ると、単身世帯による空調負荷は増大し、4人世帯による負荷は減少した。また、全世帯で見ると単身・4人世帯の計算結果が相殺された形となった。しかし、単身世帯数割合が本研究で仮定した地域以上に拡大したり、単身世帯割合がさらに上昇する可能性も考えられる。

4. おわりに

本研究では、都市域の空間的・統合的な空調用エネルギー負荷推計モデルの構築を目指して、外的要因として室外気温、住宅の総熱貫流率、空調床面積を、内的要因として世帯属性別の空調設定温度、空調稼働率等を構成要素とする夏季空調負荷を時空間で推定するためのモデルを用いて、世帯構成の違いによる空調稼働パターンを考慮することにより、空調負荷と家族形態との関連を分析した。

福岡市を解析対象として空調負荷を計算した結果、一般的な原単位法により作成した空調エネルギー消費量と比較して分布形状は概ね一致した。（ただし、両者の数値を単純に比較することはできない。）今回の計算は、住宅の構造を考慮に入れることができる反面、そのパラメータの設定によっては計算結果（負荷量の推定）に大きく影響することになる。一方、世帯の構成人員の分布情報や空調稼働パターン等も考慮に入れていることで、分布形状についてはより現実に近いものになっていると思われる。

また、世帯構成の変化を仮定し、空調負荷との関連性について計算した。世帯構成の変化として「女性の社会進出」と「世帯人員の減少」を取り上げた（福岡市中心部の単身世帯割合を10%増加、単身世帯以外の世帯において女性の50%が有職者になると仮定）。この条件で計算した結果、単身世帯の空調負荷は増加し（12.7%増）、4人世帯の空調負荷は減少した（24.2%減）。全世帯で見るとやや減少した（5.82%減）。

今回の計算では世帯構成の変化に注目した一例を示したが、この計算方法によって、様々なライフスタイルの変化について空間的定量的な検討が可能となる。なお、今回の計算条件の仮定は、福岡市の実際の世帯構成の変化を想定しているわけではないため、今後は統計情報等を参考にして、より現実的な変化を仮定して計算する必要がある。

謝辞：本研究の計算に必要な数値に関して、国立環境研究所一ノ瀬俊明主任研究員より貴重な情報及び資料

を提供して頂きました。また、本研究の遂行に際して、九州大学松本亨助教授にご協力、貴重なご助言を頂きました。なお、本研究の一部は文部省科学研究費奨励研究(A)の助成を受けました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 谷川寛樹, 上野賢仁, 井村秀文: 都市熱環境特性と家庭のエネルギー消費特性の関連に関する研究, 環境システム研究, Vol. 25, pp. 201-208, 1997.
- 2) 井上宇市編: 空調調和ハンドブック, 丸善株式会社, 1996.
- 3) 松尾陽, 村上周三, 宮田紀元, 鎌田元康, 坂本雄三: 現代の気象テクノロジー 7 建築と気象, 朝倉書店, 1993.
- 4) 上野賢仁, 井村秀文: 都市熱環境モデルを利用した空調エネルギー需要の空間分布推計, 環境システム研究, Vol. 27, pp. 165-170, 1999.
- 5) 統計情報研究開発センター: 平成7年国勢調査地域メッシュ統計, 1994.
- 6) エネルギー計量分析センター: 民生部門エネルギー消費実態調査(家庭部門編I),
- 7) (社)日本動力協会: 家庭用冷房需要の実態調査報告書, 1993.
- 8) 大濱隆司・金子慎治・上野賢仁・井村秀文: 三次元クロージャーマodelによる都市熱環境構造の解析—福岡市周辺地域への適用—, 環境システム研究, Vol. 23, pp. 214-221, 1995.
- 9) 一ノ瀬俊明, 花木啓祐, 松尾友矩: 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, 環境工学研究論文集, Vol. 31, pp. 263-273, 1994.

ANALYSIS OF RELATIONSHIP BETWEEN HOUSEHOLD ENERGY CONSUMPTION FOR AIR-CONDITIONING IN SUMMER AND CONSTITUTION OF FAMILY IN URBAN AREA

Takahito UENO, Manabu SHIBATA, Hiroki TANIKAWA and Hidefumi IMURA

In this paper, the relationship between household energy consumption for air-conditioning in summer and constitution of family in urban area was analyzed by using the model developed in the authors' previous study (1999). This model calculates the distributions of air-conditioning load for a typical household in urban area. Based on this model, a case study for different types of constitutions of families, which were assumed with regard to the numbers of families, was performed in case of Fukuoka City area. For each category of the family constitution, the working pattern of air-conditioners was established referring to the reports by EDMC (The Energy Data and Modeling Center), etc. Then, the influences by the changes of the family constitutions, which were assumed to be increasing in ratio of one-person households and working women, were estimated spatially and discussed quantitatively for Fukuoka City area. As a result of this analysis, the air-conditioning energy load of the category of one-person family increased and the load of the four-person category decreased with this assumed change of family constitutions.